

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra pružnosti a pevnosti

**Návrh zařízení pro měření předpětí u sestav
vysokopevnostních šroubových spojů**

**The Design of the Measurement Prestress in the
Assembly of High-Strength Bolted Connections**

Student:

Bc. Jakub Vigáš

Vedoucí diplomové práce:

Ing. František Fojtík, Ph.D.

Ostrava 2012

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jakub Vigáš**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3901T003 Aplikovaná mechanika
Téma: **Návrh zařízení pro měření předpětí u sestav vysokopevnostních šroubových spojů**
The Design of the Measurement Prestress in the Assembly of High-Strength Bolted Connections

Zásady pro vypracování:

1. Pro daný šroubový spoj navrhnete dle normy ČSN EN 14399-2 vhodnou koncepci zkušebního zařízení.
2. Vytvořte 3D model navržené koncepce.
3. Proveďte základní konstrukční výpočty.
4. Navrhnete vhodné měřicí a záznamové zařízení.
5. Zpracujte technickou dokumentaci navrženého zařízení.

Seznam doporučené odborné literatury:

Norma: ČSN EN 14399-2

ČASENSKÝ, M., MAŇAS, S.: Metodika konstruování, skriptá ČVUT v Praze, Praha, 122 s. ISBN 80-01-00256-X.

DEJL, Z. Konstrukce strojů a zařízení I., Spojovací části strojů, návrh, výpočet, konstrukce, Ostrava: MONTANEX a.s., 2000.

KOLÁŘ, V., NĚMEC, I., KANICKÝ, K.: FEM - Principy a praxe metody konečných prvků. Brno: Computer Press, 1997.

LENERT, J.: Úvod do metody konečných prvků. 1. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1999. 109 s. ISBN 80-7078-686-8.

Ansys Inc. Documentation for ANSYS Release 13.0. SAS IP, Inc., 2011.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

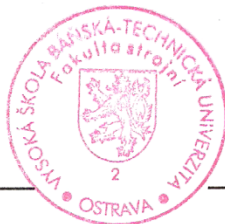
Vedoucí diplomové práce: **Ing. František Fojtík, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012



doc. Ing. Radim Halama, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 21.5.2012

..... Jakub Vigoda

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 21.5.2012

Jakub Vigáš

Bc. Jakub Vigáš

Anotace diplomové práce

VIGÁŠ,J. *Návrh zařízení pro měření předpětí u sestav vysokopevnostních šroubových spojů: Diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra pružnosti a pevnosti, 2012, 46s. Vedoucí práce: Fojtík,F.

Diplomová práce se zabývá návrhem zařízení pro měření předpětí u vysokepevnostních šroubových spojů. V úvodu je navrhnut koncept zkušebního zařízení dle normy ČSN EN 14399-2. Dále je vytvořen 3D model zkušebního zařízení v programu Autodesk Inventor. K jednotlivým dílům zkušebního zařízení jsou vytvořeny nákresy s rozměry. Další část se zabývá základními konstrukčními výpočty. Nakonec je navrhována vhodná měřicí a zaznamenávací aparatura.

Annotation of Master Thesis

VIGÁŠ,J. *The Design of the Measurement Prestress in the Assembly of High-Strength Bolted Connections: Master Thesis.* Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanics of materials, 2012, 46p. Supervisor: Fojtík,F.

This thesis describes the design of the device for measuring preload in bolted joints. In the introduction, the concept is designed to test equipment according to ČSN EN 14399-2. Next is created a 3D model of test equipment in Autodesk Inventor. For individual parts of the test apparatus are created drawings with dimensions. Another part of thesis deals with the basic design calculations. Finally is designed suitable measuring and the recording apparatus.

OBSAH

POUŽITÉ ZNAČENÍ	3
1 Úvod.....	4
1.1 Předepjaté šroubové spoje.....	7
1.2 Metody vyvození předpětí	8
1.2.1 Kontrola předpětí.....	9
1.3 Vliv mazání na utahování šroubů.....	9
2 Návrh koncepce zkušebního zařízení	10
2.1 Šneková převodovka	13
2.2 Model snímače krouticího momentu.....	14
2.3 Redukce.....	15
2.4 Přípravek pro utahování matice	16
2.5 Vyměnitelné redukce pro utahování matic	17
2.6 Systém měření úhlu natočení matice	17
2.7 Uchycení šnekové převodovky k základnímu stolu.....	18
2.8 Ocelová deska a přípravek pro umístění šroubu s podložkou pod šroub.....	19
2.9 Sestava pro snímání prodloužení šroubu	22
2.10 Rozpěrky	23
2.11 Sestava zkušebního zařízení.....	23
3 Základní konstrukční výpočty	25
3.1 Utahovací momenty šroubů	25
3.1.1 Výpočet přítláčné síly šroubů.....	26
3.1.2 Výpočet utahovacího momentu.....	27
3.1.3 Pevnostní kontrola šroubu	29
3.2 Kontrola vybraných částí sestavy pomocí MKP	30
3.2.1 Analýza úchyty převodovky.....	31
3.2.2 Analýza přípravku pro upevnění šroubu	33
3.2.3 Analýza redukce mezi snímačem krouticího momentu a převodovkou.....	36
4 Měřicí a záznamové zařízení	38
4.1 Snímač krouticího momentu	38
4.2 Snímač osových sil.....	39
4.3 Snímač prodloužení šroubu.....	40
4.4 Aparatura pro snímače krouticího momentu, síly a prodloužení	41

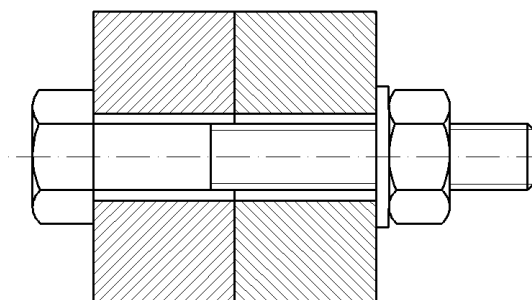
4.5 Snímač úhlu natočení matice	43
5 Závěr	44
Seznam použité literatury	45
Seznam příloh	46

POUŽITÉ ZNAČENÍ

Značka	Význam	Jednotka
$\varnothing D$	Průměr	[mm]
$\varnothing D_d$	Průměr díry pro šroub	[mm]
$\varnothing D_k$	Průměr hlavy šroubu	[mm]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
F, F_o	Osová síla	[N]
F_z	Třecí síla v závitech	[N]
M, M_k	Krouticí moment	[Nm]
M_{tm}	Třecí moment pod hlavou šroubu	[Nm]
M_{tz}	Třecí moment na závitech	[Nm]
M_u	Utahovací moment	[Nm]
N	Normálová síla	[N]
P	Rozteč závitu	[mm]
Re	Mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
W_k	Modul průřezu v krutu	[mm ³]
$\varnothing d_2$	Střední průměr závitu	[mm]
$\varnothing d_3$	Malý průměr závitu	[mm]
f	Součinitel tření	[-]
f_z	Součinitel tření na závitech	[-]
k	Součinitel bezpečnosti	[-]
k_s	Součinitel bezpečnosti šroubu	[-]
μ	Poissonova konstanta	[-]
σ_{red}	Redukované napětí	[MPa]
σ_t	Tahové napětí	[MPa]
τ_k	Napětí v krutu	[MPa]
φ'	Redukovaný třecí úhel	[°]
ψ	Úhel stoupání závitu	[°]

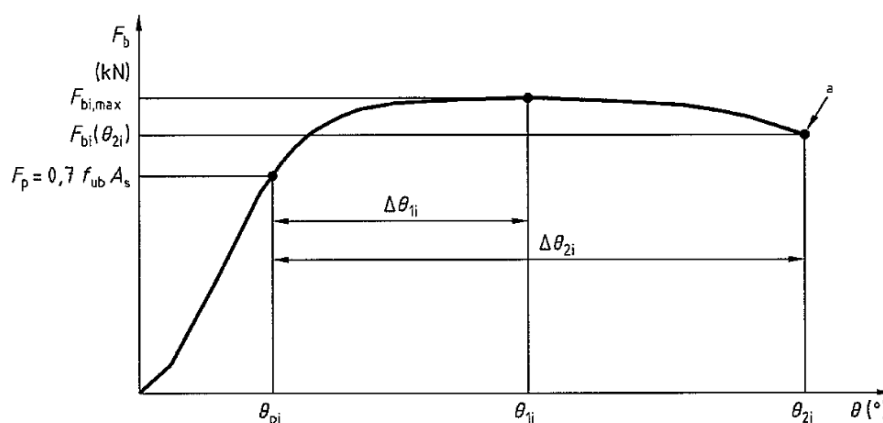
1 Úvod

Cílem této práce je navrhnout zkušební zařízení pro zkoušku měření předpětí vysokopevnostního šroubového spoje. Nákres šroubového spoje je na obrázku 1.1. Ten se skládá ze šroubu, podložky a matice. Zařízení pro měření předpětí u sestav vysokopevnostních šroubových spojů pak musí měřit veličiny stanovené normou ČSN EN ISO 14399-2. Jedná se především o osovou sílu ve šroubu vznikající vlivem utahování matice a úhel natočení mezi maticí a šroubem. Dalšími volitelnými veličinami, které norma stanovuje, jsou pak velikost utahovacího momentu matice a prodloužení šroubu. Výsledkem takovéto zkoušky jsou pak závislosti osově síly ve šroubu na úhlu natočení matice, závislost osově síly na vyvozeném krouticím momentu a závislost síly na prodloužení šroubu [1].



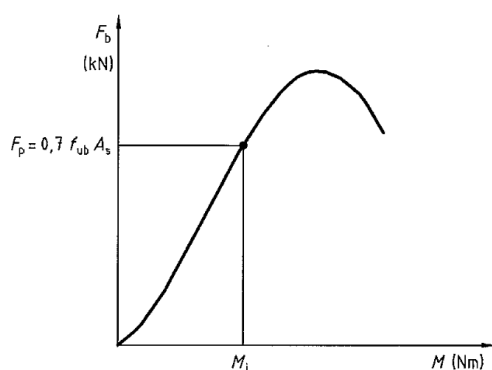
Obr.1.1 – Šroubový spoj

Na obrázku níže je závislost síly působící ve šroubu na natočení matice (obr. 1.2). Na vodorovné ose je úhel natočení matice θ a na ose svislé pak velikost osově síly F .

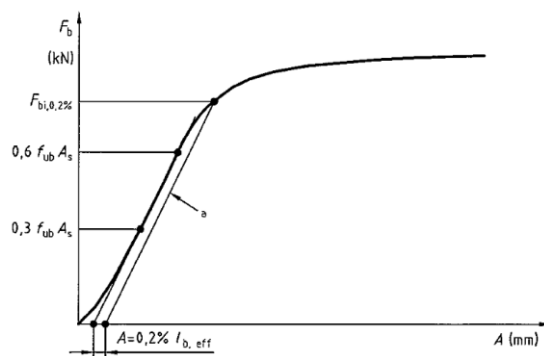


Obr.1.2 – Závislost osově síly ve šroubu na úhlu natočení matice [1]

Další závislosti, které norma uvádí je velikost osově síly na velikosti utahovacího momentu (obr.1.3 a) a velikost osově síly v závislosti na prodloužení šroubu (obr.1.3 b) [1].



Obr.1.3 a) – závislost síla/moment



Obr.1.3 b) – závislost síla/prodloužení

Tyto všechny veličiny je tedy při dané zkoušce měřit a příslušné zkušební zařízení musí tedy zahrnovat přístroje pro jejich měření.

V současnosti je ke zkoušení šroubů užíváno především hydraulických trhacích zařízení, která ovšem nesplňují požadavky normy ČSN EN ISO 14399-2. Takovéto zařízení totiž měří pouze osovou sílu ve šroubu a popřípadě prodloužení šroubu. Zkouška na takovémto zařízení je vždy destruktivní. Mezi nedestruktivní zkušební zařízení měřící osovou sílu patří například zařízení firmy Skidmore-Wilhelm (obr. 1.4). Jednotlivé modely jsou pak odstupňovány pro různé velikosti šroubů [13]. Toto zařízení měří pouze osovou sílu ve šroubu.



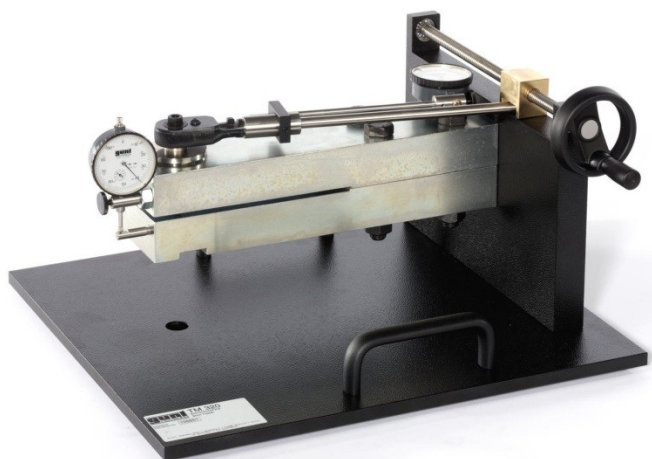
Obr. 1.4 – zařízení pro měření osově síly ve šroubu firmy Skidmore-Wilhelm

Jako další příklad sériově vyráběného zařízení může být uvedeno zařízení pro měření předpětí ve šroubu Chenxin AEC-500 firmy Zhejiang Chenxin Machine Equipments (obr. 1.5). Uvedené zařízení měří také krouticí moment. Toto zařízení je schopno měřit osovou sílu do $F=500\text{N}$ a krouticí moment do $M=2000\text{Nm}$ (hodnoty udávané výrobcem).



Obr. 1.5 – zařízení pro měření předpětí šroubu Chenxin AEC-500

Mezi další přístroje patří například výuková pomůcka firmy G.U.N.T. (obr. 1.6). Tento přístroj měří závislost mezi utahovacím momentem a vzniklou osovou silou ve šroubu. Maximální utahovací moment, který je schopno zařízení měřit je ovšem jen $M=40\text{Nm}$. Maximální osová síla pak $F=40\text{kN}$. Tyto hodnoty udává výrobce na svých internetových stránkách [14].



Obr. 1.6 – Zařízení firmy G.U.N.T. TM 320

1.1 Předepjaté šroubové spoje

V technické praxi se nejčastěji používají právě předepjaté šrouby. Předpětí v těchto šroubech je vyvozeno utahováním matice, kdy se spojované součásti (např. příruby) stlačují k sobě a šroub se prodlužuje. Předpětí ve šroubu se využívá například u spojů, které jsou namáhány provozními silami, které by mohly zapříčinit nefunkčnost takového spoje (např. těsnost sešroubovaných přírub atd.). Proto je nutno takovýto šroubový spoj navrhnout s předpětím. Předpětí pak bývá voleno na druhu použití tohoto spoje. V praxi se pak používá součinitel sevření spoje, což je požadovaný poměr zbytkového předpětí ve šroubu a maximální provozní síly. Pro výpočty takovýchto šroubových spojů pak existují příslušné normy (např. ČSN EN 1591-1). Maximální předpětí, které pak šroub snese, není jednoduché určit. Závisí hlavně na zvolené literatuře, která se danou problematikou zabývá. Tím se zabývá například česká norma ČSN 73 1495. Tato norma pak doporučuje volit předpětí na druhu použitého materiálu šroubu (a tedy podle třídy pevnosti). Hodnoty předpětí a tím vyvozeného napětí ve šroubu pak jsou samozřejmě různé a vychází z meze pevnosti daného šroubu (viz tabulka 1). Obecně navrhované předpětí pak je v rozsahu od 50% do 90% meze kluzu materiálu šroubu, a to z toho důvodu, aby nedocházelo u šroubu k plastickým deformacím. Výpočet takového šroubového spoje je pak popsán například v [2].

Tab.1.1-Hodnoty předpětí pro různé pevnostní třídy šroubů dle ČSN 73 1495

Třída pevnosti šroubu	Mez pevnosti [MPa]	Doporučené napětí v % meze pevnosti [-]
8.8	800	přibližně 56%
10.9	1000	přibližně 63%

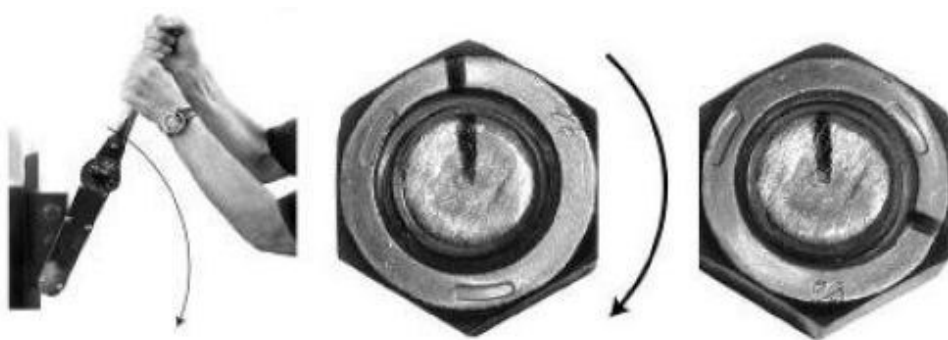
1.2 Metody vyvození předpětí

K vyvození předepsaného předpětí u šroubových spojů se využívá různých metod. Nejčastějším způsobem vyvození požadovaného předpětí je za pomoci momentového klíče (obr. 1.7). Zde se vychází z potřebné osově síly (předpětí), pro které se vypočte dle příslušných vztahů potřebný utahovací moment (viz např. [2]). Ten se pak na příslušném utahovacím zařízení nastaví. Pro větší šrouby a utahovací momenty se pak používá pneumatických, elektrických a hydraulických utahováků.



Obr. 1.7 – Momentový klíč

Mezi další způsoby patří metoda pootočení matice. Princip metody spočívá v jednoduchém označení matice a dříku značkou. Následným utahováním matice se značka na matici vůči značce na dříku šroubu pohybuje (obr. 1.8). Pro vyvození daného předpětí pak je nutné otočit maticí o daný úhel. Využití této metody je spíše u staticky namáhaných spojů.



Obr. 1.8 – Metoda pootočení úhlu matice

Jako další metody pro vyvození předpětí lze uvést metodu zahřátí šroubu, použití speciálních talířových podložek nebo použití tzv. matice „Superbolt“ (obr. 1.9).



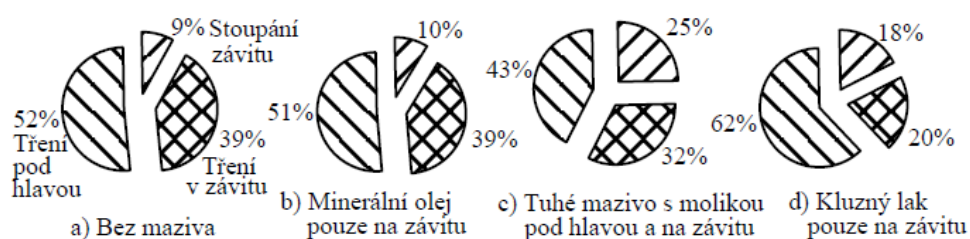
Obr.1.9 – Matice „Superbolt“

1.2.1 Kontrola předpětí

Kontrola vyvozeného předpětí se provádí například měřením prodloužení šroubu vlivem utažení matice. To se provádí například použitím mikrometrů nebo ultrazvuku. Mezi další metody kontroly předpětí patří použití speciálních identifikačních podložek.

1.3 Vliv mazání na utahování šroubů

Na závislosti předpínací síly ve šroubu - utahovací moment má nejvýraznější vliv stoupání závitu, tření pod hlavou a tření v závitech [3]. Při předpínání šroubů je pak doporučováno použít mazivo. Vhodné mazivo pak prodlužuje životnost spoje snížením pnutí v závitu a snížením namáhání dříku krutem. Percentuální rozdělení vlivu jednotlivých faktorů na velikost předpětí je na obr. 1.10 [3].



Obr. 1.10 – Poměr faktorů závislosti utahovacího momentu a velikosti předpínací síly

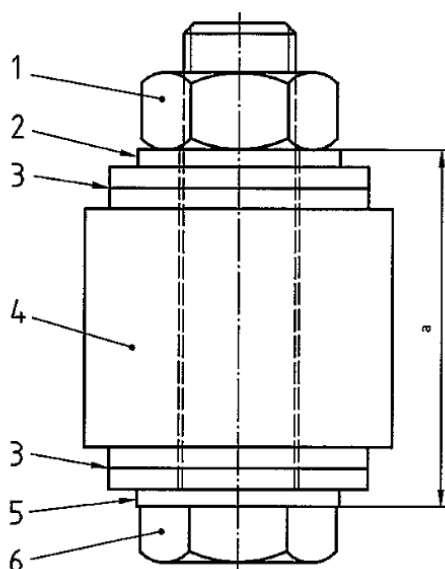
Detailní popis vlivu maziva na utahování šroubu je pak možné nalézt v [3].

2 Návrh koncepce zkušebního zařízení

Pro zkoušení vysokopevnostních šroubů existuje norma ČSN EN ISO 14399-2. Tato norma stanovuje zkoušku utahování, která ověří vhodnost vysokopevnostních šroubů k předpínání v kovových konstrukcích. Účelem této zkoušky je pak prokázání chování spojovací součásti (šroubu) v sestavě k zajištění požadovaného předpětí [1]. Dle této normy bude celé zkušební zařízení navrženo. Dále tato norma stanovuje princip zkoušky. Ten spočívá v tom, že se během zkoušky a po utažení měří tyto parametry:

- síla působící ve šroubu
- relativní natočení mezi maticí a šroubem
- krouticí moment, je-li požadován
- prodloužení šroubu, je-li požadováno

Z těchto měřených veličin se pak sestavují příslušné grafické závislosti jednotlivých veličin, jak bylo popsáno v kapitole 1. Jednoduché schéma znázorňující sestavu zkušebního zařízení je pak na obrázku 2.1 [1], kde rozměr a značí délku měřeného spojení.



Obr.2.1 – Zkušební sestava

Jednotlivé pozice u této sestavy pak jsou:

- 1- matice – otáčí se v průběhu měření
- 2- podložka pod maticí
- 3- kalené vložky (rozpěrky pro rozdílné délky šroubu)
- 4- kalibrované zařízení měřící osovou sílu
- 5- podložka pod hlavou šroubu
- 6- zkoušený šroub – zabráněno v otáčení

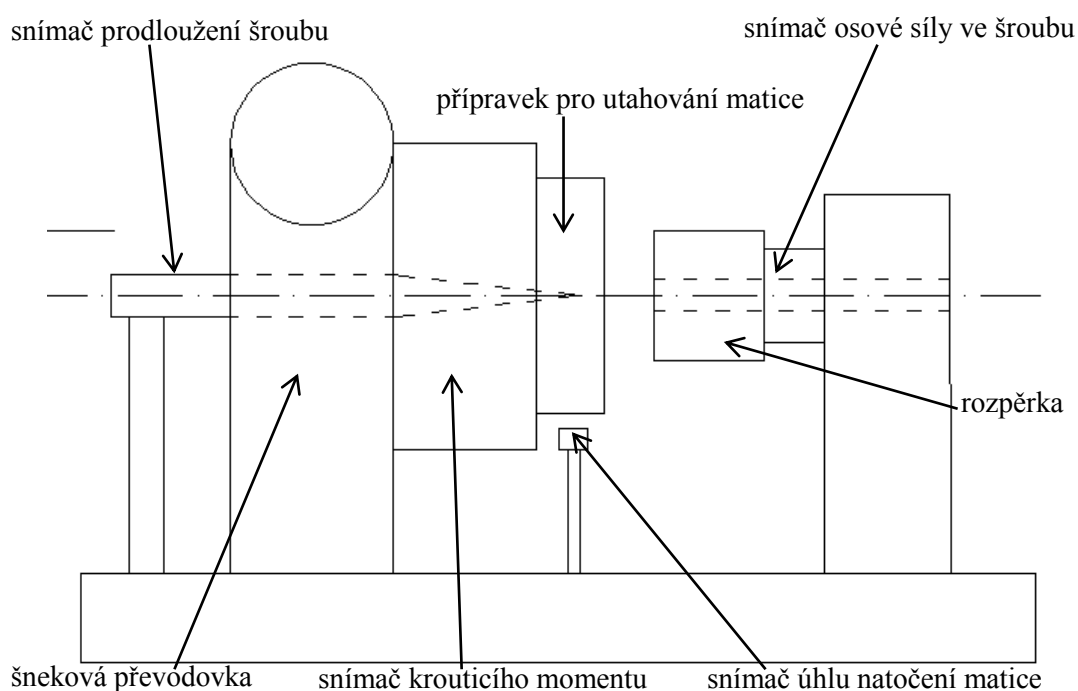
Tento zkušební soubor bude tedy výchozí návrh zkušebního zařízení. Navrhované zkušební zařízení bude tedy obsahovat následující měřicí zařízení:

- snímač osově síly
- snímač krouticího momentu
- zařízení pro měření prodloužení šroubu
- snímač úhlu natočení matice

Jednotlivá měřicí zařízení pak musí měřit s určitou přesností (viz [1]). Z dostupné literatury pak byly zjištěny hodnoty, kterých bude dosahováno při zkoušení šroubů [3]. Jedná se především o osovou sílu F , kterou bude muset být schopen měřit příslušný snímač a dále pak krouticí moment, který bude muset vyvinout převodovka a následně měřit snímač krouticího momentu. Z [3] vyplývá, že pro šroub M24 je osová síla největší a její hodnota je přibližně $F=300000\text{N}$ (závislé na druhu maziva). Dále je pak z literatury [3] možné odečíst příslušný krouticí moment pro vytvoření takového předpětí. Maximální krouticí moment pak bude přibližně $M=1500\text{Nm}$. Členy měřicí sílu a moment budou samozřejmě zvoleny tak, aby přenesly o něco větší zatížení.

Navrhovaný zkušební přístroj pak dle normy musí být vyroben z oceli a základna, na které bude celá sestava namontována, musí být dostatečně tuhá. Všechny rozpěrky je nutno kalit po celém průřezu na tvrdost 45-50HRC.

Předem byly zvoleny velikosti šroubů, které bude navrhovaný přístroj schopen zkoušet. Dané zařízení tedy bude navrženo pro velikosti šroubů M12 až M24 s délkami od $l = 70 \text{ mm}$ až do $l = 240 \text{ mm}$. Možnost měření různých velikostí a délek šroubů pak bude realizováno pomocí vyměnitelných rozpěrek pro různé délky šroubů a vyměnitelných průchozích hlavice pro utahování matice. Všechny rozpěrky a hlavice musí být kaleny z důvodu otlacení. Utahování matice pak bude řešeno pomocí šnekové převodovky. Převodovka i snímač krouticího momentu budou průchozí, aby mohlo být měřeno prodloužení šroubu. Prvotní schéma měřicího zařízení je na obrázku níže (obr.2.2).

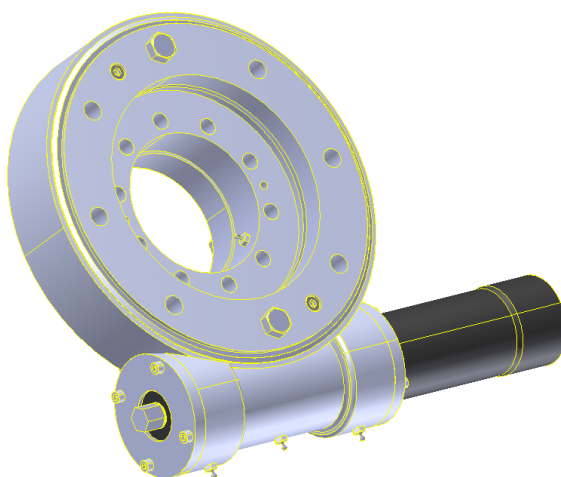


Obr.2.2 – Schéma zkušebního stroje

Jedná se pouze o návrh zkušebního zařízení, tudíž zde nebudou řešeny výrobní výkresy navrhovaných dílů. Dále budou řešeny pouze připojovací rozměry zvolených měřicích zařízení a navrhovaných dílů.

2.1 Šneková převodovka

Nejprve bylo nutno najít vhodnou převodovku pro vyvození krouticího momentu na matici. Jako nejvhodnější byla nakonec zvolena šneková převodovka. Převodovka navíc musí být průchozí z důvodu měření prodloužení šroubu. Vycházelo se z hodnoty maximálního utahovacího momentu pro vyvození příslušné předpínací síly na největším rozměru šroubu M24. Z [3] byla vyčtena hodnota utahovacího momentu pro maximální osovou sílu s mazáním závitu přibližně $M=1200 \text{ Nm}$. Bez mazání by tento moment byl vyšší, tak bylo počítáno s maximálním krouticím momentem $M=1500 \text{ Nm}$. Převodovka, která vyhovovala těmto parametrům, byla od firmy KMI (Kinematics Manufacturing, Inc. [7]). Její maximální krouticí moment je $M=1862 \text{ Nm}$. Jedná se o typ „Slew drive“ s označením SE7C(HA) (obr.2.3). Tato převodovka je navíc vybavená elektromotorem, tudíž nemusí být utahování matice řešeno ručním pohonem.



Obr.2.3 – Šneková převodovka SE7C

Důležité rozměry pro připojení snímače krouticího momentu viz příloha A. Z těchto rozměrů se pak jedná především o připojovací roztečný průměr otvorů pro šrouby. Hodnota tohoto průměru je $\text{ØD}=203,2 \text{ mm}$. Na tomto průměru bude upevněna redukce pomocí osmi šroubů M12. Na tuto redukci pak bude připevněn snímač krouticího momentu. Redukci pak bude věnována jedna z následujících kapitol (kapitola 2.3). Parametry této převodovky jsou uvedeny v následující tabulce (tab.2.1). Pro pozdější tvorbu 3D sestavy byl ze stránek KMI stáhnut model příslušné převodovky.

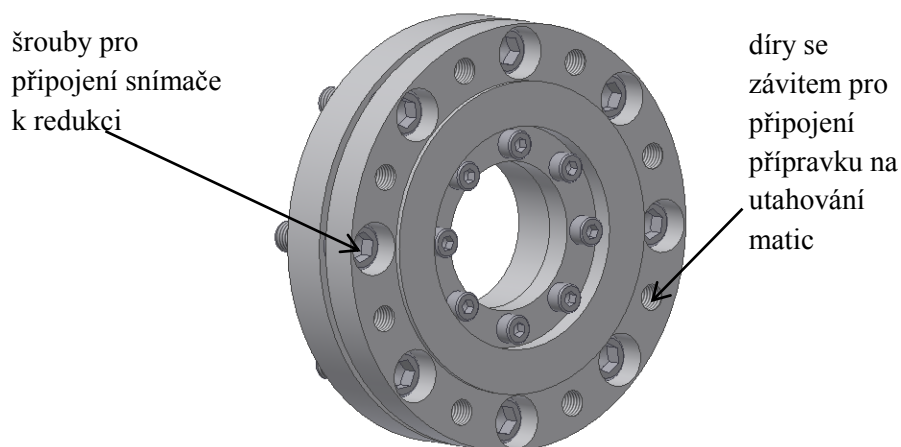
Tab.2.1 – Parametry převodovky SE7C

Převodový poměr	73:1	[-]
Rychlost otáčení	0,1	[ot/min]
Výstupní krouticí moment	1862	[Nm]
Vstupní krouticí moment na elektromotoru	85	[Nm]
Napájení elektromotoru	24	[V]

2.2 Model snímače krouticího momentu

Snímač krouticího momentu byl také zvolen tak, aby přenesl požadovaný krouticí moment. Na tento snímač bude navazovat příruba s vyměnitelnými nástavci pro různé velikosti matic, na které se bude krouticí moment přenášet. Vhodný snímač bude takový, který přenesl o něco větší krouticí moment než je požadovaných 1200Nm. Takový snímač je možno sehnat od firmy HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH). Tato firma vyrábí snímače pro měření různých velikostí krouticích momentů. Pro zkušební zařízení je pak vhodný typ TB1A pro krouticí moment $M=2000\text{Nm}$ [8]. Rozměry tohoto snímače viz příloha A.

Důležitý je opět rozměr roztečné kružnice s dírami pro šrouby. Ten má hodnotu $\varnothing D=165\text{mm}$. Na tomto průměru je osm děr pro šrouby M14, kterými bude snímač připevněn k redukci. Dále se na snímači nachází dalších osm děr se závitem pro šrouby M14 pootočených o $22,5^\circ$ vůči prvním osmi díram. Pomocí těchto rozměrů byl vytvořen 3D model v programu Autodesk Inventor (obr.2.4).

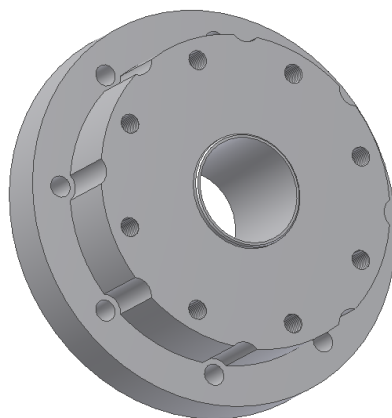


Obr.2.4 – 3D model snímače krouticího momentu TB1A

Na obrázku výše (obr.2.4) jsou zobrazeny připojovací šrouby M14x40 pro připojení snímače k redukci. Je zde taky vidět osm děr se závitem pro šroub M14.

2.3 Redukce

Šneková převodovka a snímač krouticího momentu mají rozdílné připojovací rozměry. Z tohoto důvodu mezi snímačem krouticího momentu a šnekovou převodovkou bylo nutno navrhnout redukci. Jedná se o jednoduchou přírubu s dírami pro osm šroubů M12 na jedné straně a osmi děrami se závitem pro šroub M14 na straně druhé. Závít pro tyto šrouby jde do hloubky 30mm. Výsledná podoba redukce je pak vytvořena v programu Autodesk Inventor (viz obr.2.5).

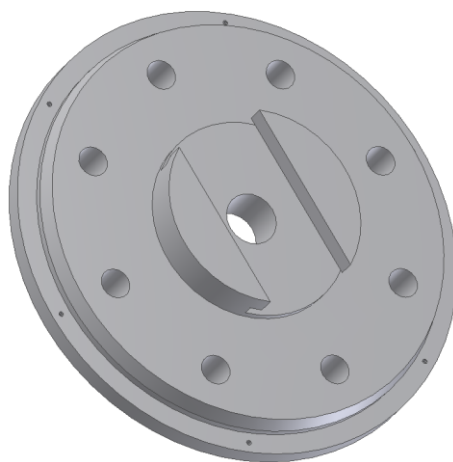


Obr.2.5 – 3D model redukce mezi snímačem krouticího momentu a převodovkou

Z obrázku je pak vidět rozmístění jednotlivých děr pro připojení příslušných částí (převodovky a snímače). Základní rozměry redukce jsou uvedeny v příloze (příloha B). Díry pro šrouby M12 jsou pak pro připojení k převodovce a díry se závitem pro připojení snímače krouticího momentu.

2.4 Přípravek pro utahování matice

Aby zkušební zařízení bylo schopno měřit rozdílné velikosti šroubů, bylo nutno navrhnout přípravek, který toto pomocí výměnných redukcí umožní. Přípravek bude připojen přímo na snímač krouticího momentu pomocí osmi šroubů M14x35. Na tento přípravek bude následně připevněna část zařízení pro měření úhlu natočení matice. Tato část zařízení pro měření úhlu bude připevněna pomocí šesti šroubů M3x12. Dále pak bylo nutno navrhnout systém pro výměnu redukcí na utahování matic (viz kapitola 2.5). Jako vhodné řešení pak byla navržena T-drážka, do které se budou redukce s příslušným rozměrem pro matici nasouvat. Koncept tohoto přípravku pak byl následně vytvořen v programu Inventor (obr.2.6).

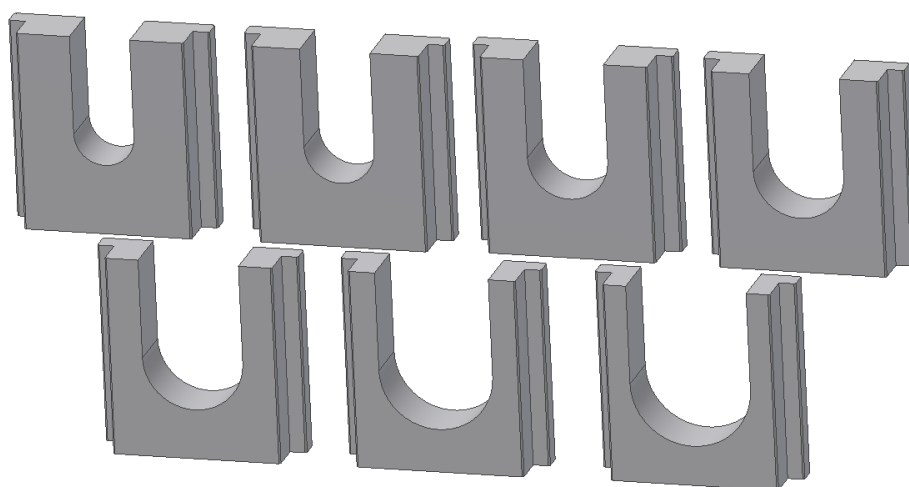


Obr.2.6 – 3D model přípravku pro utahování matic

Rozměry navrhovaného přípravku jsou pak uvedeny v příloze B.

2.5 Vyměnitelné redukce pro utahování matic

Aby bylo možno zkoušet různé velikosti šroubů, bylo nutno navrhnout systém výměnných hlavic. Nejprve bylo uvažováno se sadou průchozích nástrčných klíčů, který lze běžně na trhu sehnat (například sada firmy Tona). Tyto sady však obsahují pouze klíče do velikosti M19. Proto byl navrhnut systém, který bude zapadat do T-drážky v přípravku pro utahování matic (viz kapitola 2.4). Výsledná podoba redukcí je pak na obrázku 2.7.



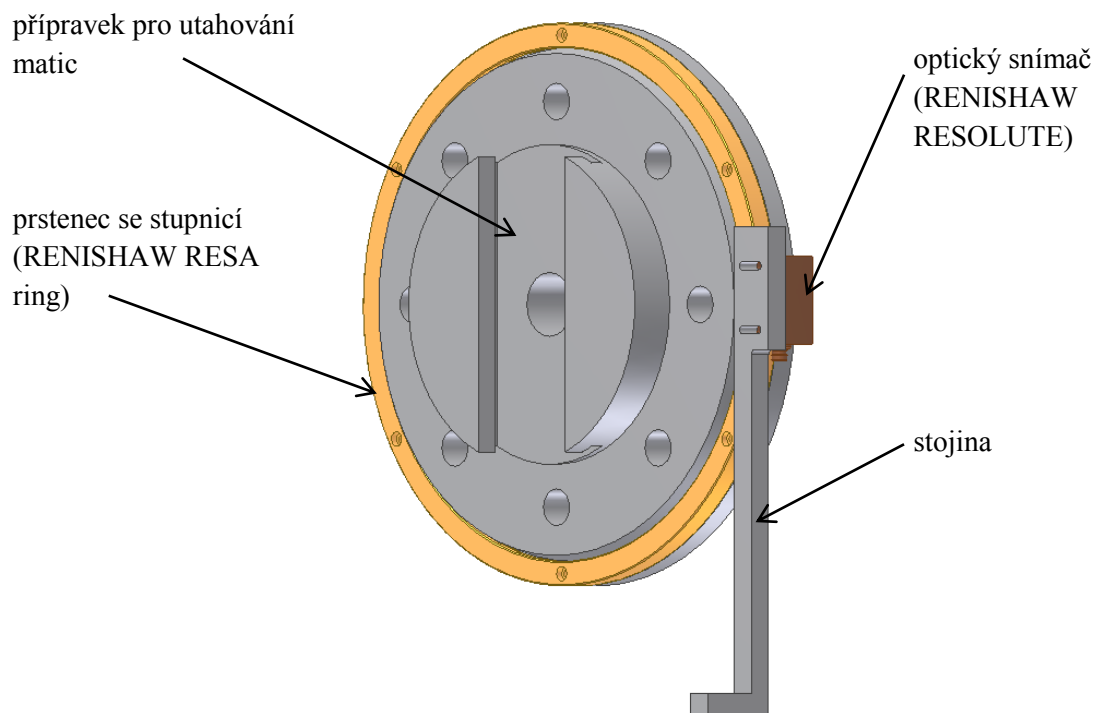
Obr.2.7 – 3D model vyměnitelných redukcí

Rozměry jednotlivých redukcí jsou pak shodné. Liší se pouze velikostí otvoru pro matici. Redukce by měli být vyrobeny z oceli a nejlépe kaleny, aby nedocházelo k jejich otlačení. Rozměry redukce pro šroub M24 jsou v příloze C.

2.6 Systém měření úhlu natočení matice

Na přípravek pro utahování matic pak následně bude připevněno zařízení pro snímání úhlu natočení matice. Pro navrhovaný zkušební stroj byl zvolen optický snímač natočení od firmy RENISHAW [12]. Přesné označení zařízení je RESOLUTE™ RESA absolute angle encoder. Toto zařízení se skládá z optického snímače (ten je pevně uchycen k rámu zařízení) a z kovového prstence se stupnicí, který se našroubuje na místo, kde chceme měřit úhel natočení. Podle technické dokumentace dostupné

z internetových stránek byl vytvořen 3D model snímače s prstencem uchycený na stojině (obr.2.8). Pomocí této stojiny bude snímač upevněn na rám zkušebního zařízení.



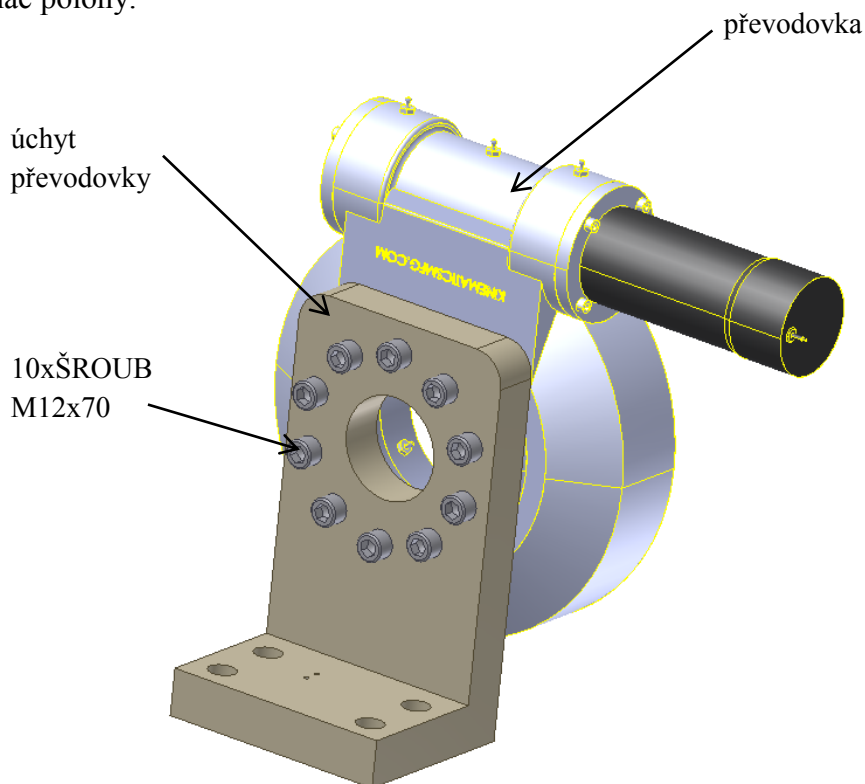
Obr.2.8 – Sestava optického snímače

Optický snímač bude ke stojině připevněn pomocí dvou šroubů M3x16. Stojina pak bude připevněna k základnímu rámu stroje pomocí dvou šroubů M3x16. Důležitá je pak pozice samotného optického snímače vůči prstenci. Výrobce uvádí mezeru mezi snímačem RESOLUTE a prstencem o velikosti 0,8mm s tolerancí $\pm 0,15\text{mm}$. Důležitá tedy bude výška středu optického snímače od základny. To z důvodu, aby snímač byl umístěn tečně k prstenci. Ta byla z výsledné koncepce nakonec stanovena na 170mm. Stojina a její rozměry jsou pak v příloze C.

2.7 Uchycení šnekové převodovky k základnímu stolu

Celá zkušební sestava bude z důvodu zjednodušení upevněna na ocelové desce (viz kapitola 2.8). Realizovaný projekt však může být celkově poupraven a upevnění může být realizováno samotným výrobcem. Základní koncept uchycení vychází z roztečné kružnice děr na převodovce a průchozího kruhového otvoru pro umístění

snímače polohy. Model byl opět zhotoven v programu Inventor (obr.2.9). Upevnění je pak realizováno pomocí deseti šroubů M12x70. Bylo taky vzato v úvahu připevnění k ocelové desce. Z toho důvodu jsou na tomto dílu čtyři díry pro šrouby M18x40. Dále jsou pak na úchytu dvě díry se závitem M4 do hloubky 10mm pro upevnění stojiny pro snímač polohy.



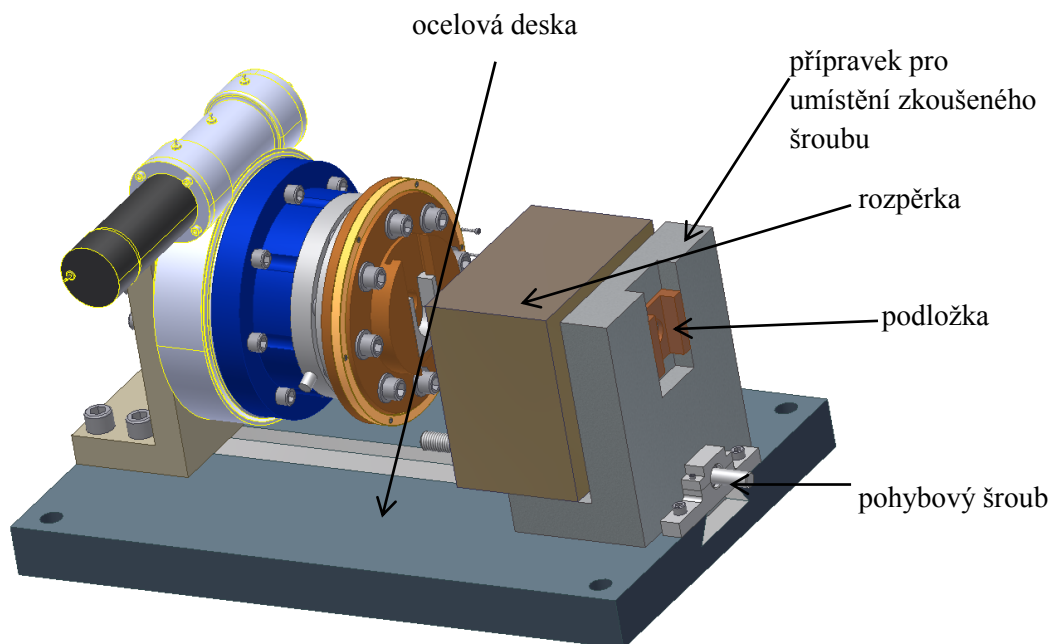
Obr.2.9 – Uchycení šnekové převodovky

Rozměry úchytu převodovky jsou v příloze D.

2.8 Ocelová deska a přípravek pro umístění šroubu s podložkou pod šroub

Celé zkušební zařízení bylo nutno umístit na nějaký rám popřípadě stojan. Zde navrhnuté řešení je ocelová deska s ribinovou drážkou, ve které se bude moct nastavovat z důvodu různých délek šroubů vzdálenost mezi přípravkem pro umístění šroubu a přípravkem pro utahování matice. Jelikož převodovka se snímačem a

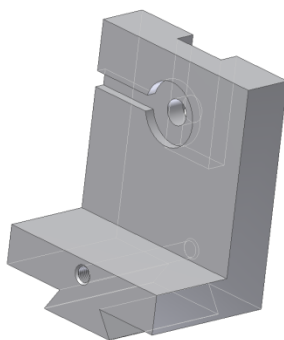
utahovacím přípravkem budou pevně spojeny se stolem (obr.2.10), bude pohyblivá část právě přípravek pro umístění šroubu.



Obr.2.10 – Ocelová deska se zkušebním zařízením

Posuv přípravku pro šroub bude realizován pomocí pohybového šroubu. V ocelové desce jsou pak na příslušných místech díry se závity pro připevnění určených zařízení. Jedná se o čtyři díry se závitem pro šrouby M18x40 (hloubka závitu 10mm) na upevnění převodovky se snímačem krouticího momentu, dvě díry se závitem (hloubka závitu 10mm) pro šroub M8x20 na uchycení domku s ložiskem pro pohybový šroub. Dále jsou v desce dvě díry se závitem pro šrouby M3x16 na uchycení stojiny s optickým snímačem. Příslušné rozměry desky jsou v příloze D. V desce se nachází ještě čtyři otvory pro šrouby M20 pro případné uchycení ke stolu.

Další navrhovanou částí je přípravek pro uchycení šroubu (obr.2.11). Aby bylo možno přípravkem pohybovat pomocí pohybového šroubu, je opatřen protikusem zapadajícím do ribinové drážky a dírou se závitem pro pohybový šroub.



Obr.2.11 – 3D model přípravku pro uchycení šroubu

Na obrázku 2.11 je také vidět kruhové zhloubení pro snímač osově síly. Rozměry pro toto zhloubení byly vzaty pro snímač firmy OMEGA s označením LC8250-1.00-75k [9]. Rozměry snímače osově síly jsou v příloze F. Rozměry přípravku jsou v příloze E. Přípravek je ještě opatřen drážkou pro podložky pod hlavu šroubu. Tyto podložky jsou řešeny obdobným způsobem jako redukce pro utahování matic (viz kapitola 2.5).

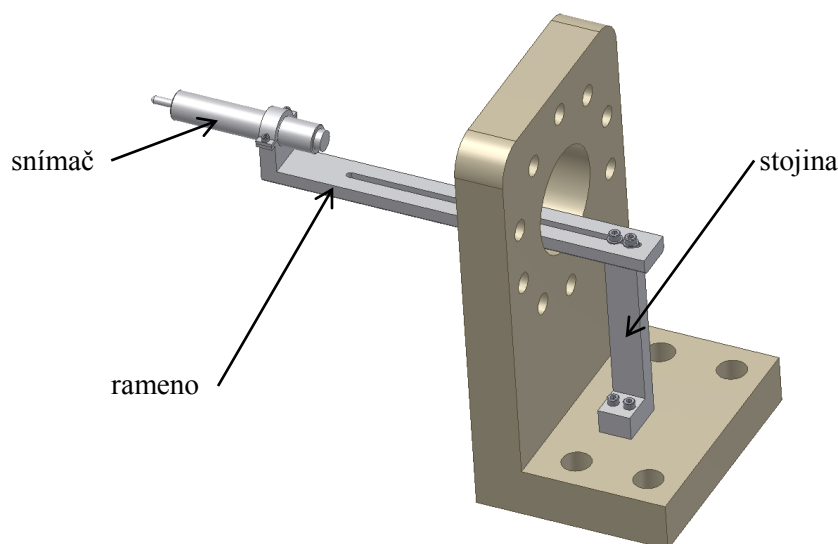
Další částí je podložka umístěná pod hlavou šroubu. Tato podložka musí zabránit otáčení šroubu. Aby bylo možno zkoušet různé velikosti šroubů, je opět nutné vyrobit sadu podložek s příslušným rozměrem pro každou hlavu šroubu (M12-M24). Rozměry podložky pro šroub M24 jsou v příloze E. Pro další šrouby se budou měnit pouze rozměry drážky pro hlavu šroubu (pro šroub M24 má velikost 36mm) a velikost otvoru pro šroub (rozměry vzaty z [4]).

Dále pro posouvání přípravku pro šroub v ribinové drážce desky byl navrhnut pohybový šroub. Jedná se o šroub TR18 délky 300mm s osazením pro připevnění kliky. Velikost šroubu byla zvolena odhadem vůči velikosti celé sestavy zkušebního zařízení. Rozměry ložiskového domku jsou pak voleny vzhledem k velikosti šroubu a umístění na ocelové desce. Vzhled a rozměry sestavy jsou v příloze E. Jedná se pouze o návrh ložiskového domku, který může být dle potřeby případného výrobce upraven.

2.9 Sestava pro snímání prodloužení šroubu

Další částí celého konceptu je snímač polohy, který bude měřit prodloužení šroubu při zkoušce. Snímač byl zvolen od firmy Vishay. Ten bude umístěn uvnitř celého konceptu na nastavitelném rameni tak, aby se měřicí hrot dotýkal dřívku šroubu. Rozměry, podle kterých byl vytvořen jednoduchý model, jsou dostupné na internetových stránkách výrobce [10]. Model pak byl vytvořen opět v programu Inventor.

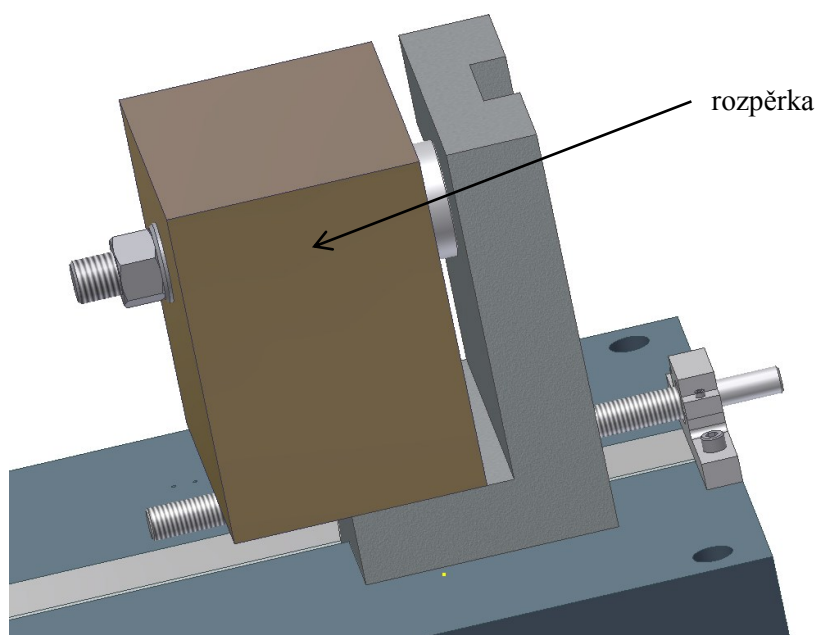
Snímač bylo nutno upevnit na stavitelné rameno, aby mohla být nastavována vzdálenost měřicího hrotu vůči dřívku šroubu. Nastavení ramene bude umožněno drážkou, přes kterou se rameno bude dotahovat dvěma šrouby ke stojině. Rozměry stojiny a ramene jsou v příloze F. Rozměry stojiny musely být navrženy tak, aby osa snímače polohy byla ve stejné výšce jako osa měřeného šroubu. Stojina bude k úchytu převodovky připevněna pomocí dvou šroubů M4x20. Celá sestava stojiny s posuvným ramenem a snímačem polohy je pak na obrázku níže (obr.2.12). Samotný snímač je pak upevněn pomocí jednoduché upínky (rozměry viz příloha G).



Obr.2.12 – Sestava snímače polohy připevněná k úchytu převodovky

2.10 Rozpěrky

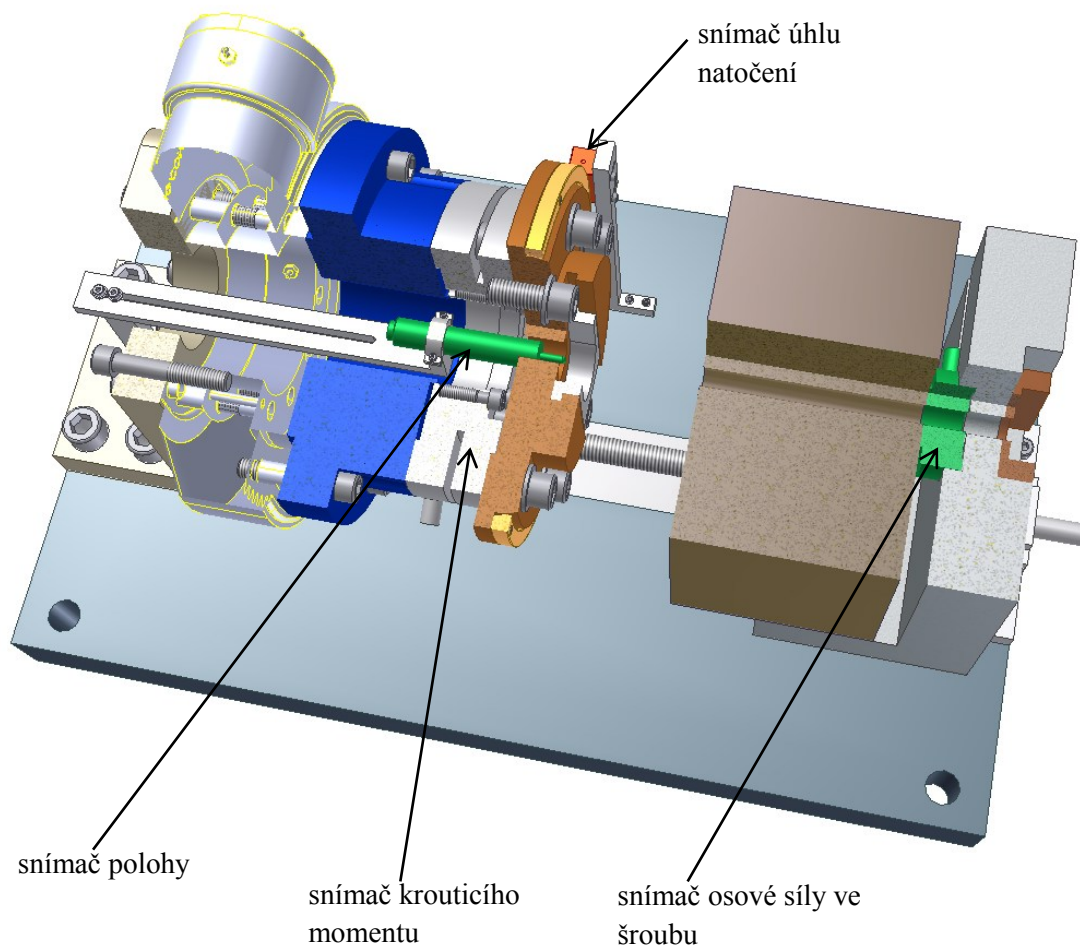
Jako poslední díl sestavy jsou rozpěrky umožňující měření rozdílných délek šroubů. Všechny rozpěrky by dle normy měly být kaleny, aby nedocházelo k jejich otlačení. Tím by totiž docházelo k ovlivnění měření prodloužení šroubu. Rozpěrky jsou umístěny mezi snímačem osově síly a maticí s podložkou. V podstatě budou rozpěrky podložky pod maticí (např. podložky ČSN EN ISO 7089) pro nejkratší délky šroubů. Pro větší délky se pak budou muset vyrobit zvláštní rozpěrky. Jedna z možností řešení rozpěrky pro největší šroub je pak na obrázku 2.13 (rozpěrka pro šroub M24x240).



Obr.2.13 – Rozpěrka pro šroub M24x240

2.11 Sestava zkušebního zařízení

Po vymodelování všech potřebných částí zkušebního zařízení mohla být vytvořena v programu Inventor finální podoba sestavy. Po zkompletování jednotlivých dílů dohromady byla sestava ještě doplněna o normované součásti jako šrouby a podložky. Výsledný koncept zkušebního zařízení je na obrázku 2.14. Všechny šrouby v sestavě jsou s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem (norma ISO 4762). Sestava je zobrazena v řezu, aby bylo vidět umístění a upevnění jednotlivých snímačů.



Obr.2.14 – Sestava zkušebního zařízení

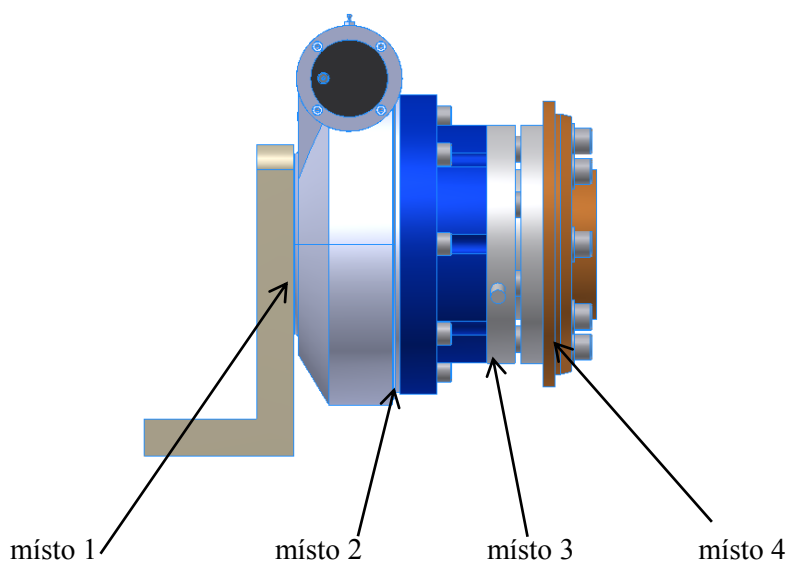
V příloze se pak nachází výkres sestavy (SN2APM01-001).

3 Základní konstrukční výpočty

V následující kapitole budou řešeny základní konstrukční výpočty. V první řadě se pak bude jednat o utahovací momenty šroubů pro připevnění šnekové převodovky, redukce se snímačem krouticího momentu a přípravku pro utahování matic. Následně bude provedena kontrola nejmenšího šroubu. Dále pak bude proveden MKP výpočet uchycení šnekové převodovky, redukce a přípravku pro uchycení zkoumaného šroubu v programu ANSYS Workbench.

3.1 Uťahovací momenty šroubů

Všechny upevnění pomocí šroubů (převodovkou počínaje a přípravkem pro utahování matic konče) budou přenášet krouticí moment třením. To z toho důvodu, aby nedošlo k namáhání šroubů na stříh. Proto bude potřeba pro každý spoj navrhnout dostatečně velký utahovací moment, který vyvede potřebnou přítlakovou sílu. Krouticí moment, který budou spoje muset přenést, vychází z maximálního momentu vyvozeného šnekovou převodovkou ($M=1862\text{Nm}$.) Ten bude ještě zvýšen o 20% kvůli bezpečnosti. Výsledný moment s uvažovanou bezpečností bude tedy $M=2235\text{Nm}$. Všechny místa, kde bude nutné dotáhnout šrouby vypočteným krouticím momentem, jsou označena na obrázku 3.1.



Obr.3.1 – Vyšetřovaná místa

Jednotlivá místa pak budou při výpočtu znamenat:

- místo 1 – úchyt s převodovkou
- místo 2 – převodovka s redukcí
- místo 3 – redukce se snímačem krouticího momentu
- místo 4 – snímač krouticího momentu s přípravkem pro utahování matic

3.1.1 Výpočet přítláčné síly šroubů

Každý šroubový spoj bude muset mít jinou přítláčnou sílu a jiný utahovací moment. Ve výsledku však postačí spočítat jen spoj, kde bude nutno vyvodit největší přítláčnou sílu a ostatní spoje už budou vyhovovat automaticky z důvodu použití šroubů stejné třídy pevnosti.

Nejprve bude tedy proveden výpočet třecí síly F_T . Tento výpočet vychází z toho, že třecí síla F_T musí být větší, než síla vyvozující krouticí moment M . Výpočet je proveden pomocí dostupného vzorce (3.1). Do něj se potom dosadí hodnota krouticího momentu a rameno $D/2$, na kterém působí síla vyvozující tento moment. Velikost ramene se pro každé místo liší a je dáno roztečným průměrem, na kterém jsou umístěny upevňovací šrouby. Vztah pro výpočet třecí síly pak je:

$$F_T = \frac{M}{D/2} \quad (3.1)$$

Tuto třecí sílu pak vyvodí normálová síla, kterou vyvodí utažení šroubu. Výpočet normálové síly N vychází z třecí podmínky a vztah vypadá následovně (3.2):

$$N = \frac{F_T}{f} \quad (3.2)$$

Ve vztahu (3.2) vystupuje součinitel tření f . Jeho hodnota v následujících výpočtech bude $f=0,2$ (jedná se o kontakt ocel x ocel). Výsledná normálová síla pak bude podělena počtem šroubů n . Z důvodu zjednodušení výpočtů, budou následující hodnoty pro

jednotlivá místa vypočteny v programu Excel. Hodnoty jednotlivých sil jsou pak v tabulce 3.1.

Tab.3.1 – Tabulka vypočtených normálových a třecích sil

místo	roztečný průměr pro šrouby [mm]	počet šroubů n	velikost šroubů	potřebná třecí síla Ft [N]	normálová síla N [N]	normálová síla F_o na jeden šroub [N]
1	120,65	10	M12	37049	185246,581	18524,66
2	203,2	8	M12	21998	109990,157	13748,77
3	165	8	M14	27091	135454,545	16931,82

V tabulce 3.1 jsou pak vypočtené hodnoty zvýrazněné tučně. Z této tabulky dále vyplývá, že nejvíce namáhané šrouby budou v místě 1 a to osovou silou $F_o=18525\text{N}$. Pro tyto šrouby bude dále vypočten utahovací moment. Pro tyto šrouby bude následně provedena pevnostní kontrola. Pro místo 4 nebyl výpočet proveden, poněvadž jsou rozměry roztečné kružnice pro šrouby, počet a jejich velikost stejné jako v místě 3.

3.1.2 Výpočet utahovacího momentu

Moment, který potřebujeme vypočítat, se skládá ze dvou samostatných momentů. Pro výpočet těchto momentů je nutné znát rozměry šroubu. Jedná se o malý průměr závitu d_3 , střední průměr závitu d_2 , průměr hlavy šroubu D_k , průměr díry pro šroub D_d a koeficienty tření f a f_z . Koeficient f je tření pod hlavou šroubu a koeficient f_z je tření v závitech (šrouby budou mazány MoS₂). Potřebné hodnoty vyšetřovaného šroubu M12 jsou uvedeny v tabulce níže (tab.3.2) [4].

Tab.3.2 – Rozměry šroubu M12 a hodnoty nutné pro výpočet utahovacího momentu

	d_3	d_2	D_k	D_d	f	f_z
M12	10,773mm	11,350mm	18mm	13,5mm	0,2	0,12

První moment (M_{tm}), z něhož se výsledný utahovací moment skládá, je od třecí síly pod hlavou šroubu. Výpočet bude proveden pomocí dostupných vztahů [2]. Vztah pro výpočet pak má tvar:

$$M_{tm} = F_o \cdot f \cdot \frac{D_k + D_d}{4} \quad (3.3)$$

Po dosazení hodnot do vztahu (3.3) dostaneme výsledný moment pod hlavou šroubu.

$$M_{tm} = 18525 \cdot 0,2 \cdot \frac{18 \cdot 10^{-3} + 13,5 \cdot 10^{-3}}{4} \cong \underline{\underline{30 Nm}}$$

Další z dvojice momentů tvořící celkový utahovací moment je moment od třecí síly F_z v závitech M_{tz} . Pro výpočet tohoto momentu je nejprve nutno vypočítat sílu v závitech F_z . Síla se vypočte pomocí vzorce (3.4) podle [2]. V tomto vzorci figurují dva úhly. Jedním z nich je úhel stoupání závitu ψ , který se vypočte ze vzorce (3.5), kde P je rozteč závitů a pro použitý šroub je hodnota $P=1\text{mm}$. Další je redukovaný třecí úhel φ' . Hodnotu redukovaného třecího úhlu získáme dosazením do vzorce (3.6), kde f_z známé z tabulky výše (tab. 2.2) a $\alpha/2=30^\circ$ (metrický závit).

$$F_z = F_o \cdot tg(\psi + \varphi') \quad (3.4)$$

$$\psi = \arctg \frac{P}{\pi \cdot d_2} \quad (3.5)$$

$$\varphi' = \arctg \frac{f_z}{\cos \frac{\alpha}{2}} \quad (3.6)$$

Po dosazení příslušných hodnot do výše uvedených vztahů dostaneme výslednou sílu F_z , její hodnota je $F_z=3098,4\text{N}$. Následně se moment M_{tz} vypočte dle vztahu (3.7) [2].

$$M_{tz} = F_z \cdot \frac{d_2}{2} = 3098,4 \cdot \frac{11,35 \cdot 10^{-3}}{2} \cong \underline{\underline{18 Nm}} \quad (3.7)$$

Výsledný utahovací moment pro jeden šroub bude vypočten dle vztahu (3.8). Ten má tvar:

$$M_u = M_{tm} + M_{tz} \quad (3.8)$$

Po sečtení obou dílčích momentů bude utahovací moment $M_u=48\text{Nm}$.

3.1.3 Pevnostní kontrola šroubu

Předem vybraný šroub (M12) bude v této kapitole početně zkontrolován, zda vyhoví pevnostně. Zvolené šrouby budou pevnostní třídy 10.9. Mez kluzu těchto šroubů pak je $R_e = 900\text{MPa}$ a mez pevnosti $R_m = 1000\text{MPa}$.

Kontrola šroubu pak vychází z Hookeova zákona pro tah. Dále jsou šrouby namáhány krutem od síly v závitech F_z . Tyto dvě namáhání jsou pak následně použita pro výpočet redukovaného napětí σ_{red} pomocí Guestovy pevnostní hypotézy (3.12). Nakonec bude vypočtena bezpečnost k_s .

Nejprve se provede výpočet tahového napětí ve šroubu od osově síly F_o dle příslušného vzorce (3.9), kde S je plocha průřezu šroubu vypočteny z průměru d_3 . Po dosazení hodnot do (3.9) dostaneme výsledné tahové napětí σ_t .

$$\sigma_t = \frac{F_o}{S} \quad (3.9)$$

$$\sigma_t = \frac{18525}{\frac{\pi \cdot 10,773^2}{4}} = 203,2\text{MPa}$$

Dále je nutno spočítat namáhání šroubu krutem od momentu M_{tz} . Smykové napětí τ_k se pak vypočte dle vztahu (3.10), kde W_k je průřezový modul. Ten se vypočte ze vztahu (3.11). Dosazením (3.10) do (3.11) a následným dosazením příslušných hodnot dostaneme výsledné smykové napětí τ_k .

$$\tau_k = \frac{M_{tz}}{W_k} \quad (3.10)$$

$$W_k = \frac{\pi \cdot d_3^3}{16} \quad (3.11)$$

$$\tau_k = \frac{M_{tz}}{\frac{\pi \cdot d_3^3}{16}} = \frac{48}{\frac{\pi \cdot 10,773^3}{16}} = 0,19\text{MPa}$$

Následuje výpočet redukovaného napětí podle Guestovy pevnostní hypotézy (3.12).

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_t^2 + 4 \cdot \tau_k^2} \quad (3.12)$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{203,2^2 + 4 \cdot 0,19^2} = 203,2 \text{ MPa}$$

Jako poslední bude spočítána bezpečnost k_s (3.13). Výsledná bezpečnost tedy je:

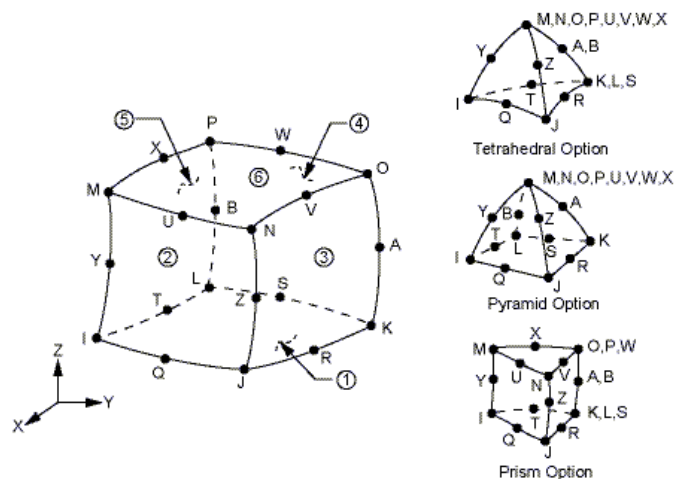
$$k_s = \frac{R_e}{\sigma_{red}} \quad (3.13)$$

$$k_s = \frac{900}{203,2} = 4,4[-]$$

3.2 Kontrola vybraných částí sestavy pomocí MKP

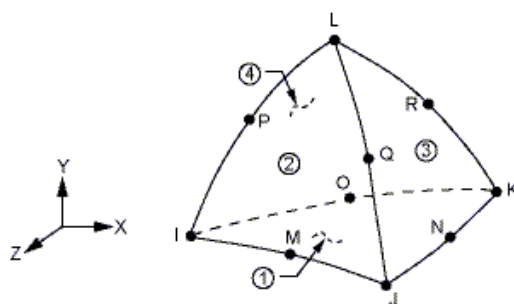
Pro vybrané části sestavy byla provedena pevnostní kontrola. Tyto části bylo nutno vyexportovat z programu Autodesk Inventor ve formátu .step. Dále byly jednotlivé díly v tomto formátu importovány do programu ANSYS Workbench. Tento program je založen na metodě konečných prvků, kdy je těleso rozděleno na malé elementy, ke kterým se pak sestavují soustavy rovnic a ty se následně numericky vyřeší [5].

Každý díl bylo nutno nejprve vysítovat a zadat patřičné okrajové podmínky. Síť byla tvořena programem Workbench automaticky. Velikost elementu byla zvolena tak, aby síť byla dostatečně jemná. Typy elementu používané v programu Workbench jsou SOLID186 a SOLID187. Element typu solid je 20ti uzlový, kde každý uzel má 3 stupně volnosti (posuvy v ose x, y, z). Vzhled a možnosti tvarů prvku SOLID186 jsou na obrázku 3.1 [6].



Obr.3.1 – Element typu SOLID186

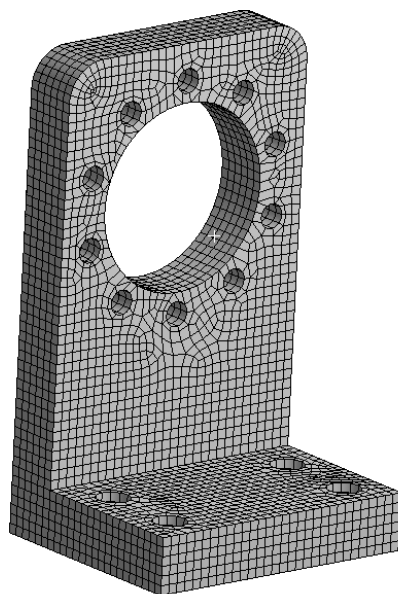
Element typu SOLID187 je pak 10ti uzlový se třemi stupni volnosti pro každý uzel (posuvy x , y , z). Vzhled prvku SOLID187 je pak na obrázku 3.2.



Obr.3.2 – Element typu SOLID187

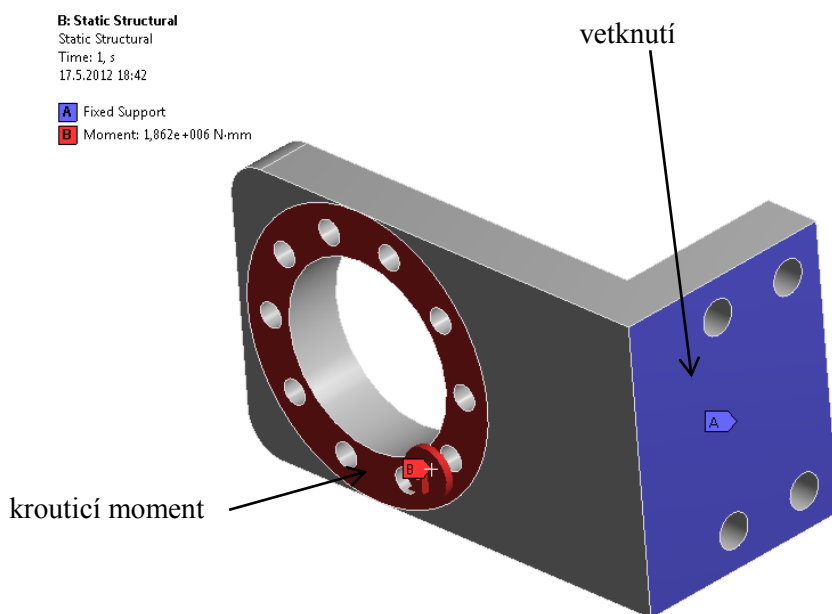
3.2.1 Analýza úchyty převodovky

Nejprve byl analyzován navrhnutý úchyt šnekové převodovky. Tento díl byl nejprve vysítován. Bylo použito metody *Hexdominant*, kdy program upřednostňuje elementy s tvarem šestistěnu. Hotová síť je na obrázku 3.3. Materiál modelu byla ocel s modulem pružnosti $E=200000\text{MPa}$ a Poissonovým číslem $\mu=0,3$. Tento materiál byl použit u všech dalších výpočtů (kapitoly 3.2.2 a 3.2.3).



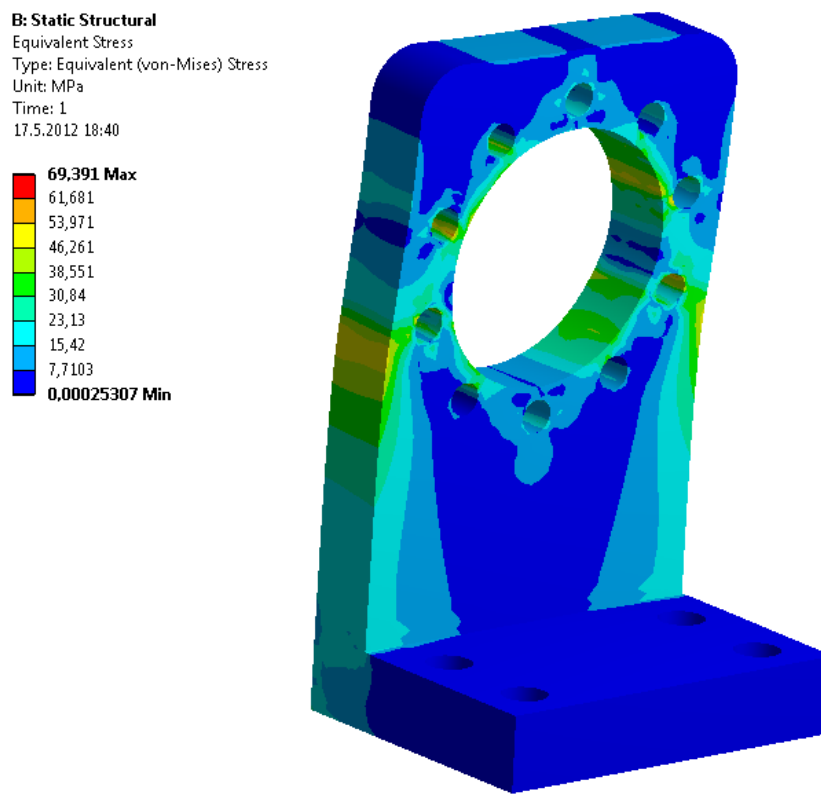
Obr.3.3 – Síť úchytu šnekové převodovky

Konečnoprvkový model obsahoval 14215 elementů s 56224 uzly. Jako okrajové podmínky potřebné pro analýzu bylo nutno aplikováno vetknutí na plochu, kterou se úchyt bude dotýkat stolu a krouticí moment kterým bude úchyt namáhán od připevněné převodovky s hodnotou $M=1862\text{Nm}$. Ten byl aplikován na mezikruží, na kterém je převodovka uchycena (obr.3.4).



Obr.3.4 – Okrajové podmínky

Dále proběhl výpočet konečnoprvkového modelu. Výsledkem pak bylo rozložení redukovaného napětí (dle hypotézy HMM) na modelu (obr.3.5).



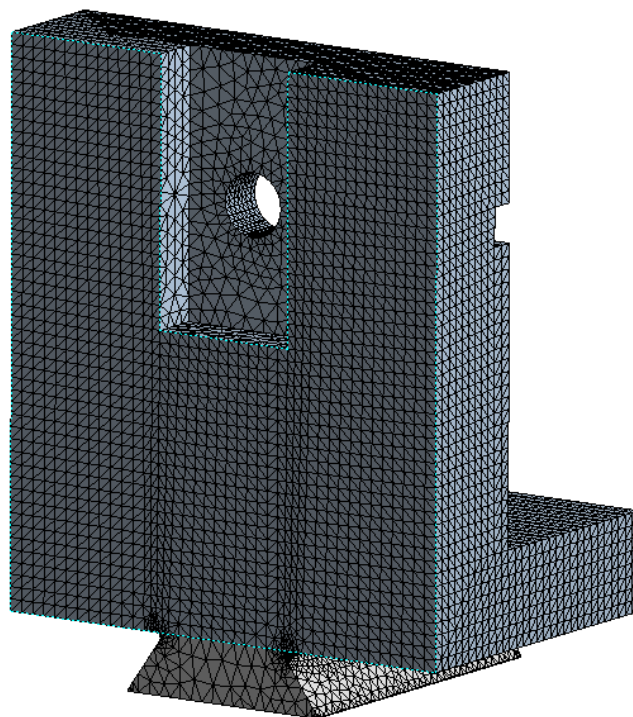
Obr.3.5 – Rozložení redukovaného napětí dle hypotézy HMM [MPa]

Z předchozího obrázku (obr.3.5) je vidět rozložení redukovaného napětí na modelu. Maximální napětí pak je 69MPa a nachází se v jednom z otvorů pro šroub. Bude-li úchyt vyroben z oceli z oceli třídy 11700.0, která má mez kluzu $Re=345\text{MPa}$, bude bezpečnost k podílem meze kluzu Re a maximálního napětí na modelu. Hodnota bezpečnosti $k=4,9$. Součást dané namáhání tedy vydrží.

3.2.2 Analýza přípravku pro upevnění šroubu

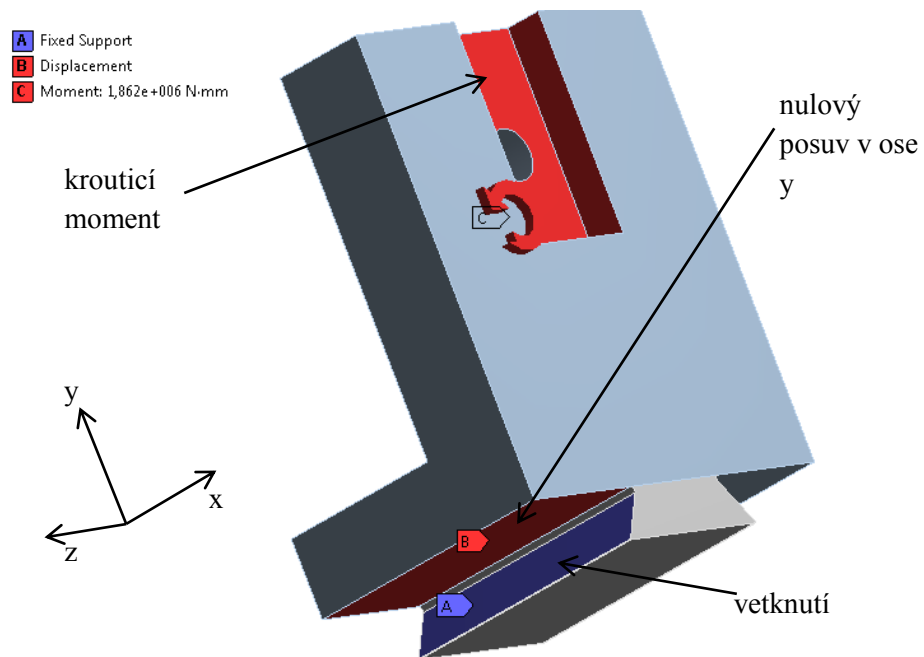
Jako další díl sestavy byl podroben pevnostní analýze přípravek pro uchycení šroubu. Proces analýzy proběhl stejně jako v předchozí kapitole (kapitola 3.2.1).

Nejprve byl model vysítován, pak zadány příslušné okrajové podmínky a následně proběhl výpočet. Vzhled sítě je na obrázku 3.6.



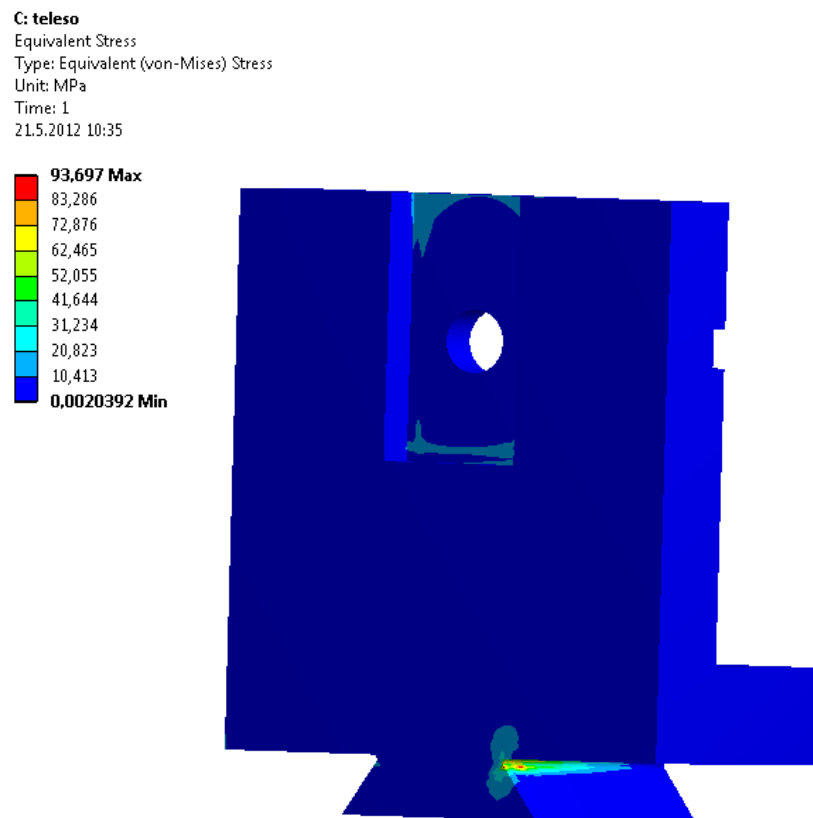
Obr.3.6 – Sít' přípravku pro uchycení šroubu

Sít' byla vytvořena metodou *Hexdominant* a navíc na obdélníkové plochy bylo aplikováno mapované síťování. Na tento konečnoprvkový model byly následně aplikovány okrajové podmínky. Jedná se pak o vetknutí na stěnách ribinového vedení a zabránění v posuvu v příslušné ose v místě, kde se přípravek dotýká stolu (obr.3.7). Dále byl aplikován krouticí moment s hodnotou $M=1862\text{Nm}$ na plochy, o které se bude opírat hlava šroubu s podložkou.



Obr.3.7 – Okrajové podmínky a zatížení krouticím momentem

Následoval výpočet, jehož výsledkem bylo opět rozložení redukovaného napětí na modelu (obr.3.8).

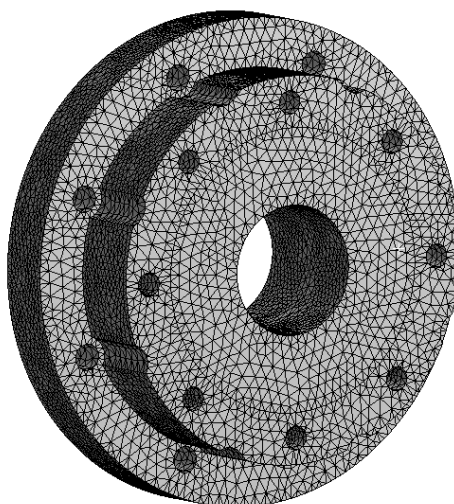


Obr.3.8 – Rozložení napětí dle hypotézy HMM na modelu [MPa]

Z předchozího obrázku je vidět, že napětí na modelu se pohybuje v rozmezí od 0 do 94MPa. Maximální napětí pak je v místě zaoblení ribinového vedení. Hodnoty jsou to celkem nízké, takže použijeme-li pro výrobu opět ocel třídy 11700, bude hodnota bezpečnosti $k=3,68$.

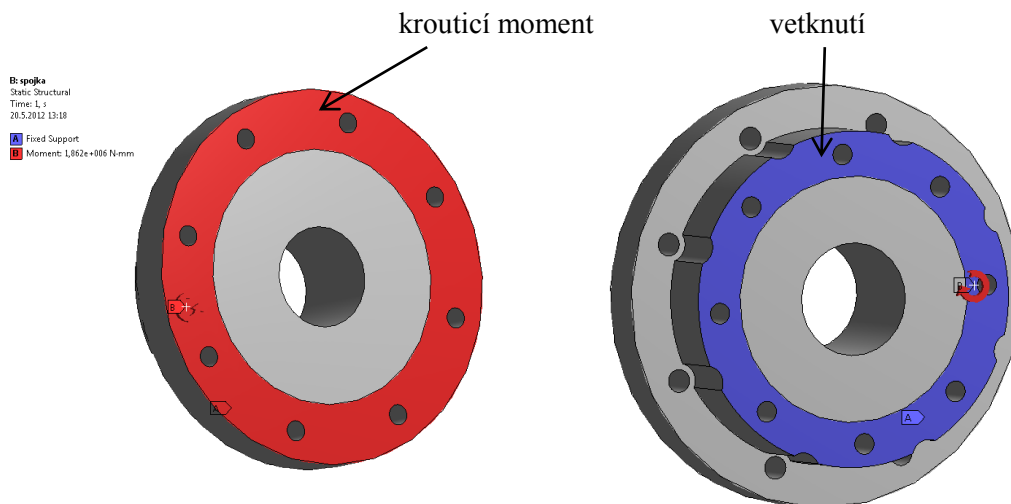
3.2.3 Analýza redukce mezi snímačem krouťicího momentu a převodovkou

Jako poslední proběhla analýza redukce, která umožňuje připojení snímače krouťicího momentu k převodovce. Stejně jako u předchozích analýz proběhlo nejprve síťování modelu, následovala aplikace okrajových podmínek a nakonec byl zpuštěn výpočet. Síť modelu byla vytvořena automatickou metodou (obr.3.9). Bylo vytvořeno 59680 elementů s 101543 uzly.



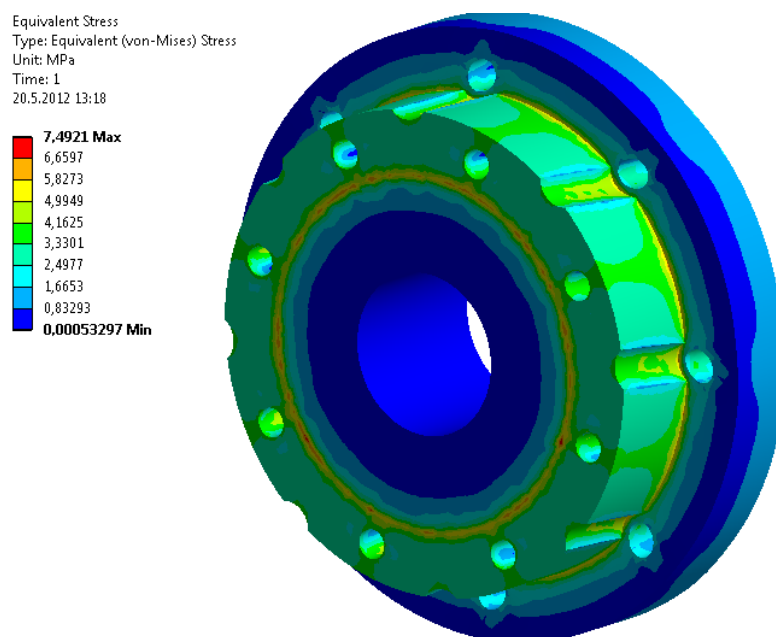
Obr.3.9 – Konečnoprvkový model redukce

Dále bylo na tento model aplikováno vetknutí na straně, kde je redukce připojena ke snímači krouťicího momentu. Na straně, kde je redukce spojena s převodovkou byl aplikován krouťicí moment s hodnotou $M=1862\text{Nm}$ (obr.3.10).



Obr.3.10 – Okrajové podmínky (vetknutí a kroucí moment)

Opět následoval výpočet, na jehož konci byly důležité výsledky rozložení napětí na modelu (obr.3.11).



Obr.3.11 – Rozložení redukovaného napětí dle HMM na redukci [MPa]

Z obrázku 3.11 je vidět, že výsledné napětí je v rozmezí od 0 do 7,5MPa. Maximální hodnota je v místě vetknutí. Je to hodnota velmi malá, takže za předpokladu použití například oceli třídy 12050 s mezí kluzu $R_e=305\text{MPa}$ pro výrobu součásti, bude koeficient bezpečnosti $k=40,6$.

4 Měřicí a záznamové zařízení

V této kapitole bude navrženo vhodné měřicí a záznamové zařízení pro snímání krouticího momentu, osově síly ve šroubu, úhlu natočení matice a prodloužení šroubu. Všechny zařízení jsou pak zvoleny s odporovými tenzometry zapojenými do můstku s milivoltovým výstupem. Pouze snímač úhlu natočení je optický s digitálním výstupem.

4.1 Snímač krouticího momentu

Návrh vhodného snímače spočíval v maximálním krouticím momentu, který by měl měřit. Jeho hodnota je $M=1500\text{Nm}$ (viz kapitola 2). Dále musí být snímač průchozí, aby skrz něj mohlo procházet zařízení pro měření prodloužení šroubu. Těmto parametrům vyhovuje snímač od firmy HBM s označením TB1A. Jedná se o snímač s odporovými tenzometry. Jedná se o snímač nerotační, přírubový s třídou přesnosti 0,05. Je vysoce odolný vůči ohybovým momentům, příčným a osovým silám a nevyžaduje velký prostor k upevnění díky svým rozměrům. Tento typ snímače se vyrábí pro měření krouticích momentů od 100Nm do 10kNm . Na výkresové dokumentaci poskytované výrobcem na internetových stránkách jsou rozměry jednotlivých snímačů pro příslušný krouticí moment [8]. Technické parametry snímače se liší od hodnoty maximálního zatížení snímače, takže zde bude uveden snímač pro krouticí moment $M=2000\text{Nm}$ (tab.4.1). Podrobnější informace k snímačům typu TB1A jsou na internetových stránkách výrobce [8]. Pro tento typ byl také vytvořen 3D model, aby mohla být vytvořena výsledná sestava zkušebního zařízení (obr.4.1).



Obr.4.1 Snímač HBM TB1A

Tab. 4.1 Technické parametry snímače TB1A pro $M_k=100Nm$

	HODNOTA	JEDNOTKA
Třída přesnosti	0,05	[-]
Citlivost snímače	$1,5 \pm 0,1\%$	[mV/V]
Odchylka od lineárního průběhu zahrnující hysterezi snímače	$< \pm 0,03$	[%]
Operační teplota snímače	-10...+60	[°C]
Referenční budící napětí	5	[V]
Maximální přípustné budící napětí	20	[V]
Hmotnost	5,8	[kg]
Stupeň ochrany dle EN 60 529	IP54	

4.2 Snímač osově síly

Pro měření osově síly ve šroubu, která vzniká utahováním matice, bylo nutno zvolit vhodný snímač. Vycházelo se z maximální osově síly, kterou musí snímač měřit. Velikost této síly byla uvedena v kapitole 2 a její velikost je $F=300000N$. Dále musel být snímač průchozí (musí jím procházet šroub). Tyto požadavky splňuje například snímač vyráběný firmou OMEGA (obr.4.2). Tato firma vyrábí snímače pro měření síly s průchozím otvorem v různých provedeních a s různými měřicími rozsahy. Zvolen pak byl snímač s označením LC8250-1.00-75k.



Obr.4.2 – Snímač osově síly OMEGA

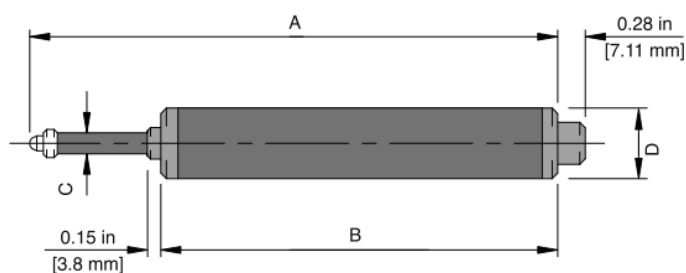
Jde o snímač s odporovými tenzometry s měřicím rozsahem osově síly do $F=333824\text{N}$. Technické údaje a rozměry snímače jsou k dohledání na internetových stránkách výrobce [9] a jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Tab.4.2 – Technické údaje a rozměry snímače LC8250-1.00-75k

	Hodnota	Jednotka
Vnější průměr snímače	64	[mm]
Vnitřní průměr snímače	25,4	[mm]
Výška snímače	25	[mm]
Měřicí rozsah	333824	[N]
Bezpečné přetížení	150% měřicího rozsahu	
Citlivost snímače	2	[mV/V]
Odchylka od linearity	$\pm 0,1$	[%]
Vstupní napětí	10	[V]
Maximální vstupní napětí	15	[V]

4.3 Snímač prodloužení šroubu

Pro měření prodloužení šroubu byl zvolen snímač s odporovými tenzometry vyráběný firmou Vishay. Tato firma vyrábí snímače polohy pro délky 5, 10, 25, 50 a 100mm. Zvolený snímač má označení HS25 a bude pro délku 5mm. Rozměry a technické údaje byly nalezeny na internetových stránkách výrobce [10] (obr.4.3). Rozměry pak byly využity při tvorbě modelu.



MODEL HS	5	10	25	50	100
*Displacement Range	0.25 in [6.5 mm]	0.5 in [11.2 mm]	1 in [26 mm]	2 in [51.5 mm]	4 in [102 mm]
Dimensions	A	4.10 in [104.2 mm]	4.30 in [109.2 mm]	5.44 in [138.2 mm]	8.48 in [215.4 mm]
	B	3.49 in [88.6 mm]	3.49 in [88.6 mm]	4.08 in [103.6 mm]	6.11 in [155.2 mm]
	C \varnothing	0.19 in [4.8 mm]	0.19 in [4.8 mm]	0.19 in [4.8 mm]	0.24 in [6.0 mm]
	D \varnothing	0.69 in [17.4 mm]	0.69 in [17.4 mm]	0.69 in [17.4 mm]	1.0 in [25.4 mm]

Obr.4.3 – Rozměry snímače polohy [10]

V tabulce níže jsou pak technické údaje snímače HS25 (tab.4.3).

Tab.4.3 Technické parametry snímače polohy HS25

	Hodnota	Jednotka
Citlivost snímače	1,75	mV/V
Odchylka od linearity	0,35	%
Budící napětí	2...10	V
Hmotnost	0,140	kg

4.4 Aparatura pro snímače krouticího momentu, síly a prodloužení

Pro snímač krouticího momentu, snímač osově síly a snímač prodloužení je nutné zvolit vhodné záznamové zařízení. Software, který bude měřená data zpracovávat je LabVIEW. Jedná se o programovací jazyk firmy National Instruments. Všechny snímače pak budou napojeny do tenzometrické karty. Vhodnou kartu nabízí například opět firma National Instruments [11]. Jedná se o kartu s typovým označením NI 9237 (obr.4.4).



Obr.4.4 – Tenzometrická karta NI 9237

Jedná se o kartu, která umožňuje zapojit až 4 tenzometrické můstky. Budící napětí je od 2,5 do 10V. tuto kartu je možné umístit do speciálního šasi. Vhodné by například bylo od firmy National Instruments NI cDAQ-9174. Jedná se o šasi se sloty až pro čtyři karty (obr.4.5). Přes toto šasi jsou karty propojeny do počítače s příslušným softwarem pomocí USB 2.0.



Obr.4.5 – Šasi NI cDAQ-9174 pro tenzometrickou kartu NI 9237

4.5 Snímač úhlu natočení matice

Pro snímání úhlu natočení bylo nutno zvolit příslušné zařízení. Z dostupných výrobků bylo zvoleno optické zařízení firmy Renishaw. Přesný název zřízení je Absolutní optický snímač RESOLUTE™. K němu pak náleží kovový prstenec s označením RESA se stupnicí. Ta má rozteč 30μm. Systém RESOLUTE s prstencem RESA je pak na obrázku 4.6.



Obr.4.6 – Snímač úhlu natočení RESOLUTE

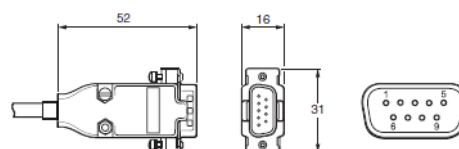
Z technické dokumentace získané ze stránek firmy Renishaw [12] byl vytvořen 3D model pro sestavu (viz kapitola 2.6). Snímač má digitální výstup, tudíž optický snímač musí být zapojen do příslušné aparatury, která je schopna sbírat tato data. Tento snímač může být k aparatuře připojen pomocí čtyř rozdílných konektorů (viz stránky výrobce [12]). Jeda z možností připojení je na obrázku níže (obr.4.7).

Connections

RESOLUTE output (B/SS serial comms)

Function	Signal ¹	Wire colour	Pin
Power	5 V	Brown	4, 5
	0 V	White	8, 9
		Green	
Serial communications	MA+	Violet	2
	MA-	Yellow	3
	SLO+	Grey	6
	SLO-	Pink	7
Shield	Inner	Inner shield	1
	Outer	Outer shield	Case

9 way D type



20 way

Obr.4.7 – Propojení snímače RESOLUTE pomocí 9 pinového konektoru

5 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout zkušební zařízení pro měření předpětí u vysokopevnostních šroubových spojů. U prvotního návrhu se vycházelo z normy ČSN 14399-2, kde byly stanoveny požadavky na schopnost zařízení měřit osovou sílu ve šroubu, krouticí moment při utahování matice, prodloužení šroubu a úhel natočení matice. Podle tohoto prvotního návrhu byl vytvořen 3D model zkušebního zařízení. V potaz byly brány přípojovací rozměry vhodných měřicích zařízení, ze kterých pak mohl být navrhnout zbytek dílů sestavy. Bylo nutno také navrhnout vhodnou převodovku pro utahování matice. Vhodná převodovka pak je od firmy **KMI** s označením **SE7C(HA)**. Jedná se o šnekovou převodovku s maximálním krouticím momentem na výstupu **$M=1862\text{Nm}$** . Pro výsledný koncept byl vytvořen výkres sestavy (SN2APM01-001).

Následovaly základní konstrukční výpočty. V první části byl vypočten utahovací moment spojovacích šroubů. Výpočet vycházel z maximálního krouticího momentu na převodovce. Výsledná hodnota utahovacího momentu byla stanovena na **$M_u=48\text{Nm}$** . V následující části byly vybrané díly sestavy podrobeny pevnostní analýze v softwaru ANSYS Workbench. Jedná se o uchycení šnekové převodovky, přípravek pro uchycení šroubu a redukci mezi převodovkou a snímačem krouticího momentu. Všechny tyto díly byly patřičně vysíťovány a byly na ně aplikovány příslušné okrajové podmínky. Výsledkem bylo rozložení redukovaného napětí dle hypotézy HMM na všech vybraných dílech. Největší napětí dosahovalo hodnoty **94MPa**. Pro všechny díly pak byl následně vypočten koeficient bezpečnosti k . U všech součástí tento koeficient převyšuje hodnotu $k=3$.

V poslední části byla navržena vhodná měřicí a zaznamenávací aparatura. Pro měření krouticího momentu byl zvolen snímač od firmy **HBM** s označením **TB1A** pro $M=2000\text{Nm}$. Jako snímač osové síly pak vyhovoval výrobek firmy **OMEGA LC8250-1.00-75k**. Pro měření prodloužení šroubu pak byl použit snímač firmy **VISHAY** s označením **HS25**. Všechny tyto snímače jsou tenzometrické a bylo pro ně navrženo příslušné zaznamenávací zařízení. To poskytuje firma **NATIONAL INSTRUMENTS**. Posledním snímačem pak je snímač úhlu natočení matice. Ten je od firmy **RENISHAW** a je optický s digitálním výstupem. Jedná se o typ Renishaw **RESOLUTE**.

Seznam použité literatury

- [1] ČSN 14399-2 Sestavy vysokopebnostních konstrukčních šroubových spojů pro předpínání – Část 2: Zkouška vhodnosti pro předpínání
- [2] KALÁB,K.: *Části a mechanismy strojů pro bakaláře - Části spojovací*, Skriptum VŠB-TU Ostrava, 2008, ISBN 978-80-248-1290-8
- [3] WALD,F., SOKOL,Z., VRZBA,V., GREGOR,D.: *K utahování šroubů třecích spojů*, ČVUT Praha, Fakulta stavební, katedra ocelových konstrukcí
- [4] LEINVEBER,J., VÁVRA,P.: *Strojnické tabulky-třetí doplněné vydání*, ALBRA, Úvaly, 2006, ISBN 80-7361-033-7
- [5] LENERT,J.: *Úvod do metody konečných prvků*, Skriptum FS VŠB-TU Ostrava, 1999, 2008, ISBN 80-7078-686-8
- [6] ANSYS INC.: *Documentation for Ansys Release 13.0* SAS IP, Inc., 2011
- [7] KMI, www.kinematicsmfg.com
- [8] HBM, www.hbm.cz
- [9] OMEGA, www.omega.com
- [10] VISHAY, www.vishay.com
- [11] NATIONAL INSTRUMENTS, www.ni.com
- [12] RENISHAW, www.renishaw.cz
- [13] SKIDMORE-WILHELM, www.skidmore-wilhelm.com
- [14] G.U.N.T., www.gunt.de

Seznam příloh

Příloha A - Rozměry šnekové převodovky a snímače krouticího momentu

Příloha B - Rozměry redukce a přípravku pro utahování matic

Příloha C - Rozměry redukce pro matici a stojiny pro snímač natočení matice

Příloha D - Rozměry úchytu převodovky a ocelové desky

Příloha E - Rozměry přípravku pro uchycení šroubu a rozměry podložky pod hlavu šroubu

Příloha F - Rozměry snímače osově síly, rozměry stojiny a ramene pro snímač polohy

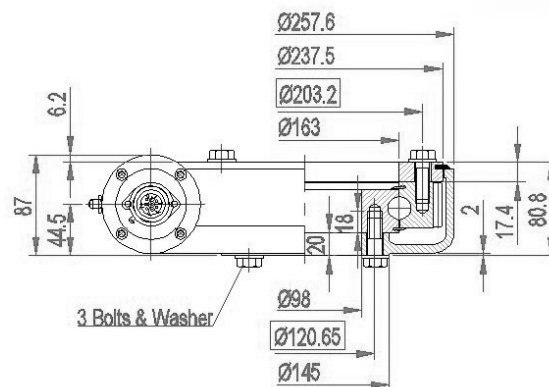
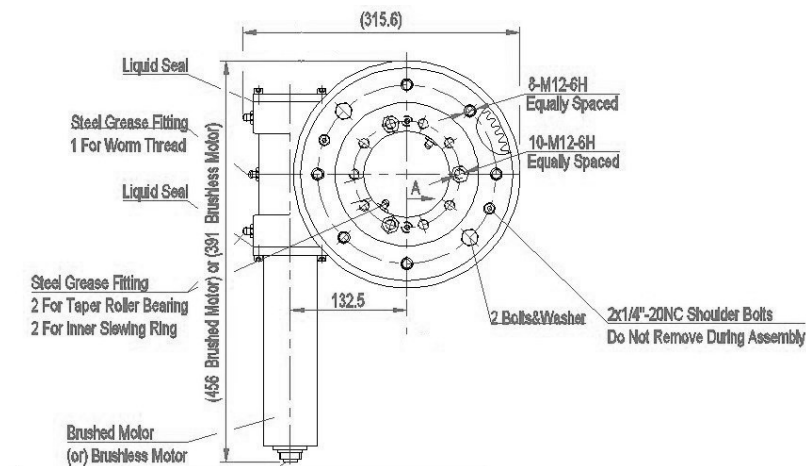
Příloha G – Rozměry upínky snímače polohy

Výkresová dokumentace:

SN2APM01-001 (formát A1)

Příloha A – Rozměry šnekové převodovky a snímače krouticího momentu

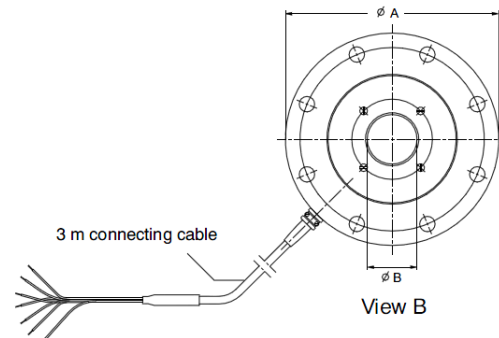
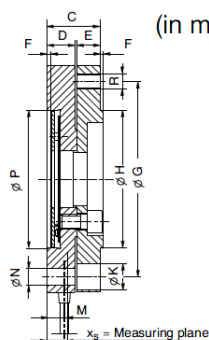
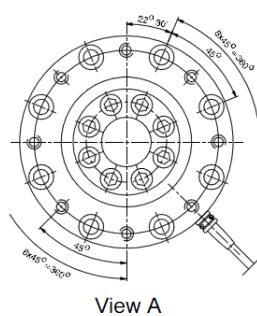
Převodovka:



Snímač krouticího momentu

Dimensions

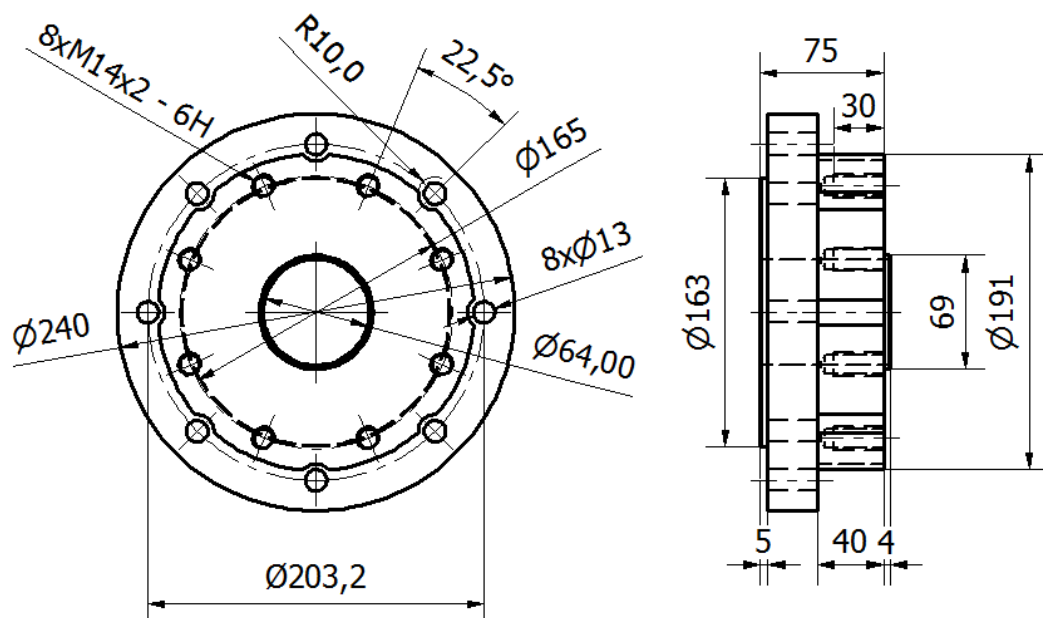
(in mm; 1 mm= 0.03937 inches)



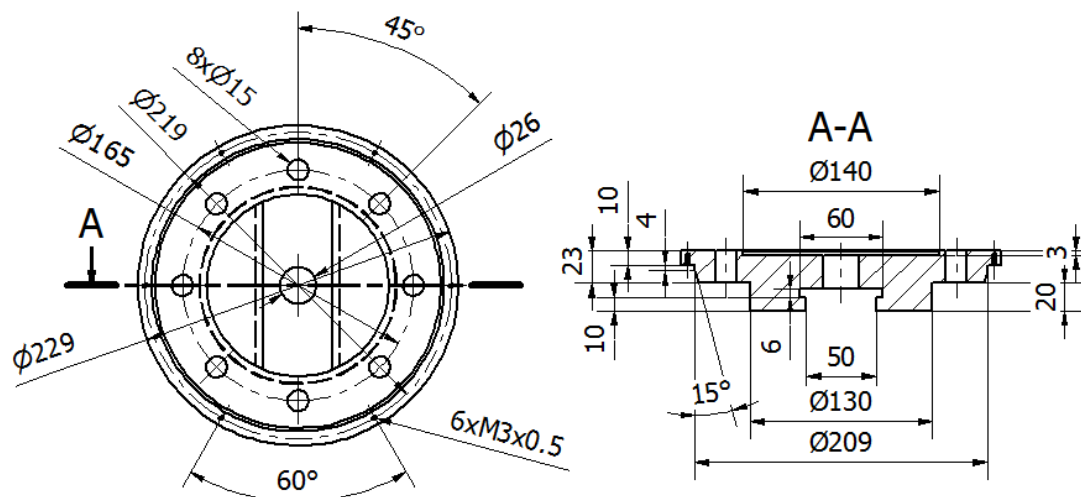
Nominal torque	ØA	ØB _{±0,1}	C	D	E	F _{+0,2}	ØG _{±0,1}	ØH _{g6}	ØK	M	ØN	ØPH ₇	R	x _s
100 N·m	100	40.2	25	15.5	7.5	2.5	87	75	11	7.8	6.4	75	8xM6	13
200 N·m	121	40.2	30.5	17.5	11	2.5	105	90	14	8.8	8.4	90	8xM8	14
500 N·m	156	41	40.5	20.5	18	2.5	133	110	20	9	13	110	8xM12	15.5
1 kN·m	156	41	40.5	20.5	18	2.5	133	110	20	9	13	110	8xM12	15.5
2 kN·m	191	69	42.5	22.5	18	2.5	165	140	24	9	15	140	8xM14	16.5
5 kN·m	238	79	64	28.5	33.5	2.5	206	174	30	9	19	174	8xM18	19.5
10 kN·m	238	79	69	33.5	33.5	2.5	206	174	30	9	19	174	8xM18	22.5

Příloha B – Rozměry redukce a přípravku pro utahování matic

Redukce:

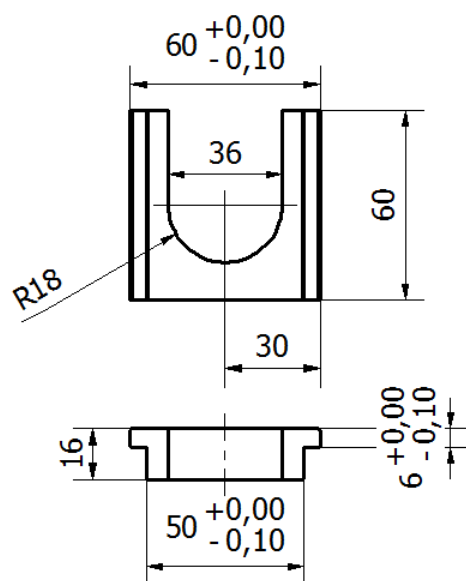


Přípravek pro utahování matic:

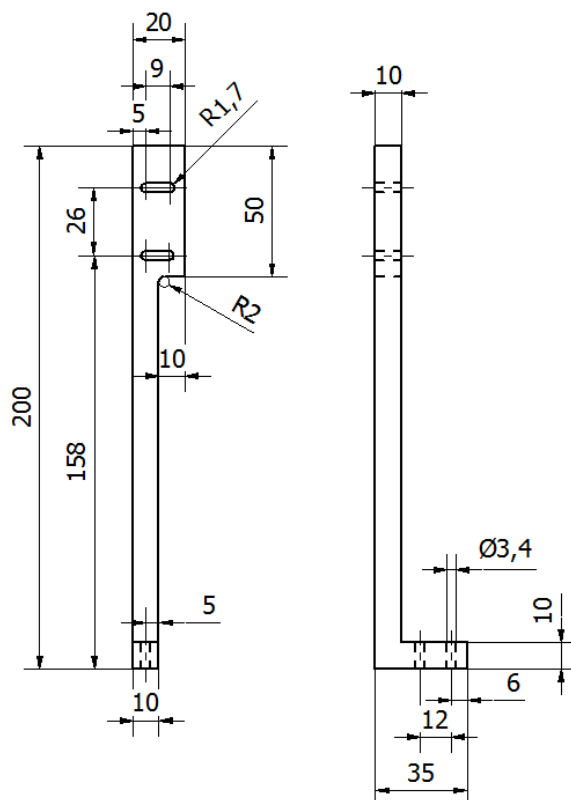


Příloha C - Rozměry redukce pro matici a stojiny pro snímač natočení matice

Redukce pro matici M24

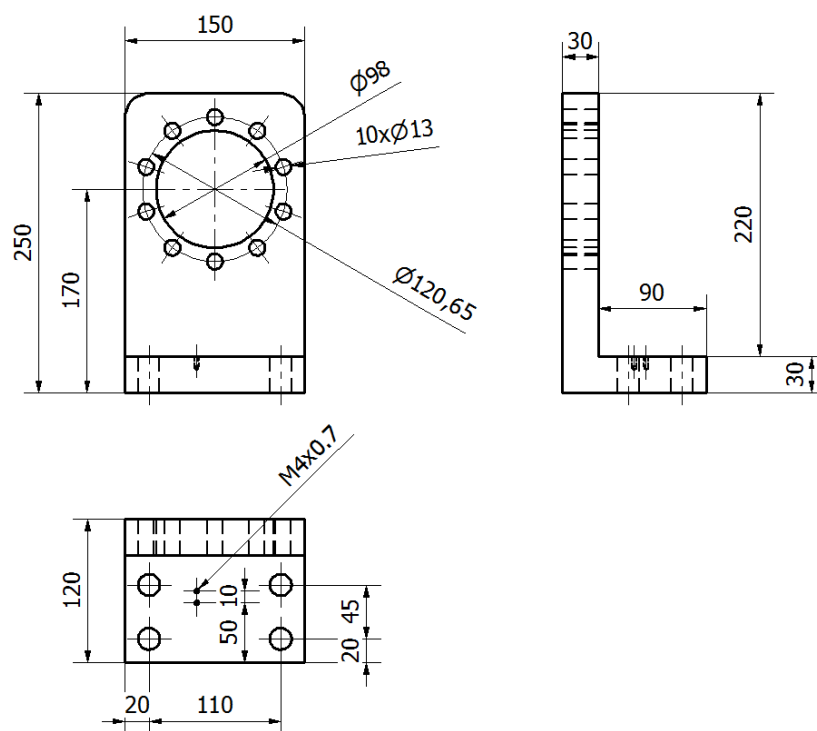


Stojina pro připevnění optického snímače RESOLUTE

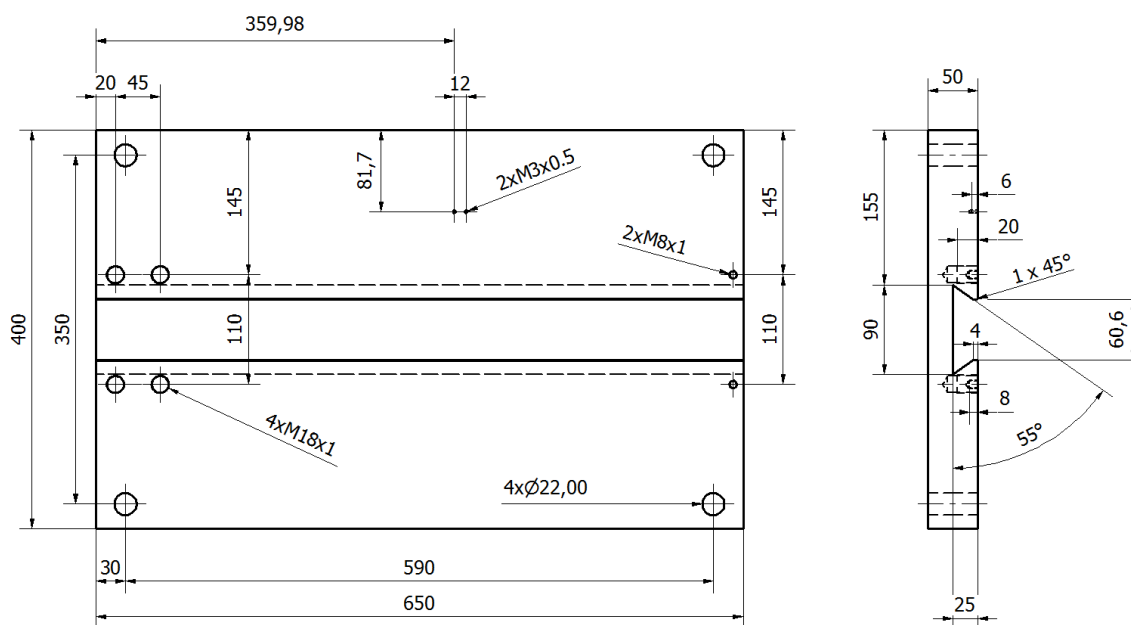


Příloha D – Rozměry úchyty převodovky a ocelové desky

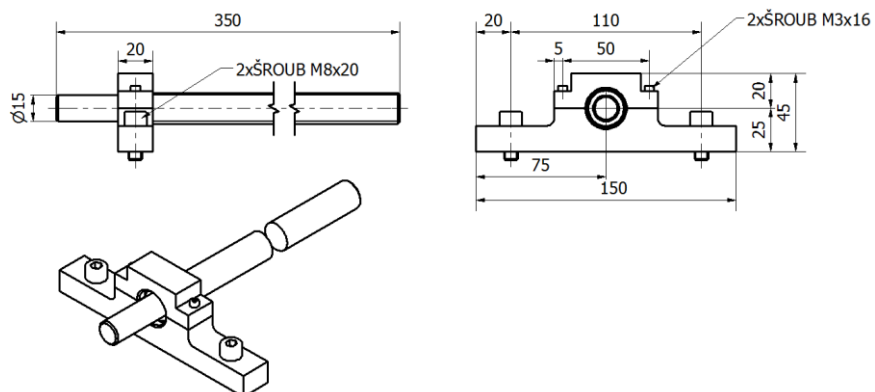
Úchyt šnekové převodovky



Ocelová deska

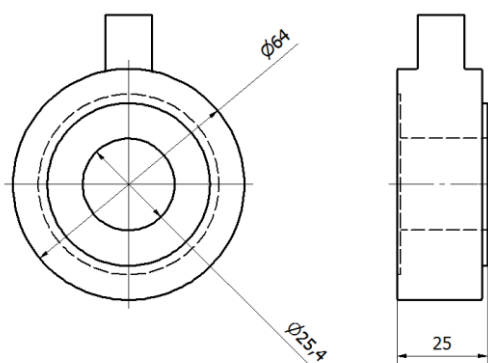


Přípravek pro uchycení šroubu

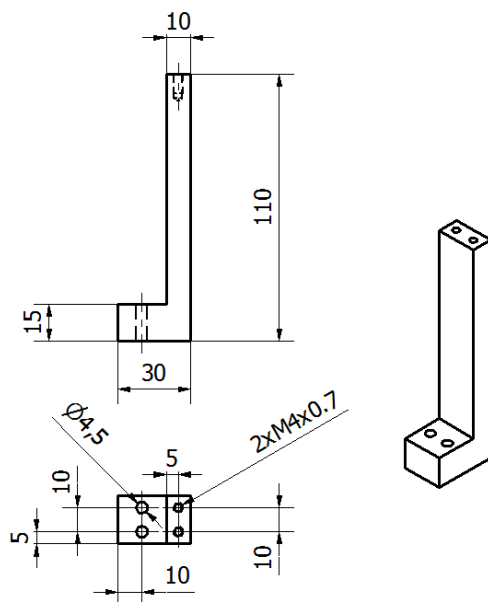


Příloha F – Rozměry snímače osově síly, rozměry stojiny a ramene pro snímač polohy

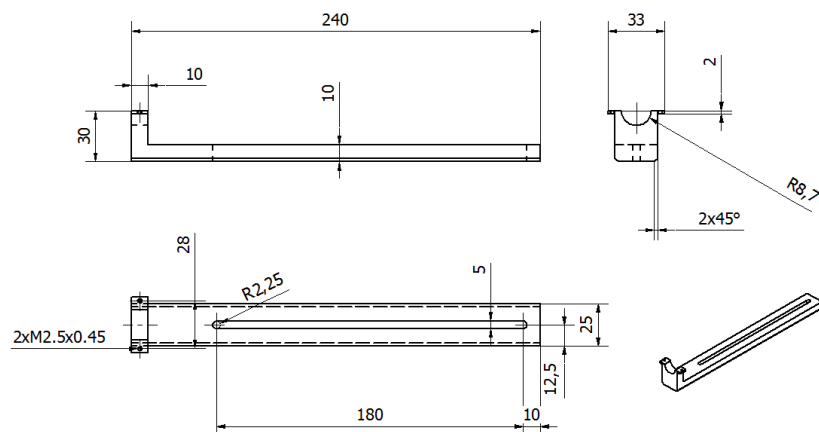
Snímač osově síly



Rozměry stojiny



Rozměry ramene



Příloha G – Rozměry upínky snímače polohy

